

Universidad de Vigo

Facultad de Ciencias de Ourense

Departamento de Física Aplicada

Grupo de Física de la Tierra y Oceanografía

*Validación climática del
modelo conceptual de
DANA*

Memoria presentada por

Raquel Olalla Nieto Muñiz

para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas

Director: Luis Gimeno Presa

Ourense, febrero de 2005

LUIS GIMENO PRESA, profesor Titular de Universidad del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo,

CERTIFICA:

Que la presente memoria, titulada 'VALIDACIÓN CLIMÁTICA DEL MODELO CONCEPTUAL DE DANA', ha sido realizada por Raquel-Olalla Nieto Muñiz bajo mi dirección en el Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias de Ourense de la Universidad de Vigo y que constituye su tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Y para que conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, firmo la presente certificación en Ourense, a 10 de febrero de 2005.

Fdo.: Luis Gimeno Presa

Quiero expresar mi más sincera gratitud:

A mi director de tesis Luis Gimeno Presa, por sus ideas y continua colaboración en la ejecución e interpretación de resultados, sin las cuales la realización de este trabajo no hubiera sido posible, y en general por su gran apoyo paciente y constante.

A Ricardo García Herrera, por su inestimable colaboración e interés en este trabajo.

A mis compañeros, Laura, Juan, Marta y Julia por estar ahí dispuestos a ayudar en lo que esté a su alcance.

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología y a la Xunta de Galicia por las ayudas concedidas a este grupo investigador, sin las cuales no hubiese podido seguir dedicándome en exclusividad a la ciencia. A la Universidad de Vigo por la beca.

A todos los componentes del VALIMOD, por ir aportando ideas en las reuniones y en especial a David Barriopedro, Agustín García, Antonio Serrano, Marcelino Núñez y Antonio Gordillo.

Al *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) y al Instituto Nacional de Meteorología (INM) por proporcionar los datos necesarios para la realización de este trabajo; al ZAMG por permitir la utilización de las imágenes.

A mis padres, mi hermano, abuela y tíos, por su confianza y cariño, por incentivar me a terminar esta tesis día tras días y animarme a lo largo de todos estos años.

A Luis por todo.

A Luis y mi familia

VALIDACIÓN CLIMÁTICA

DEL MODELO CONCEPTUAL DE DANAS

ÍNDICE	9
ACRÓNIMOS	13
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Modelo conceptual. Definición.	17
1.2. Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs).	18
1.2.1. Ciclo de vida de una DANA.	22
1.2.1.1. Desarrollo de una vaguada en niveles altos.	22
1.2.1.1.1. Descripción meteorológica.	22
1.2.1.1.2. Estructura nubosa en imágenes de satélite.	23
1.2.1.2. Ruptura ('Tear-off').	24
1.2.1.2.1. Descripción meteorológica.	24
1.2.1.2.2. Estructura nubosa en imágenes de satélite.	25
1.2.1.3. Aislamiento ('Cut-off').	26
1.2.1.3.1. Descripción meteorológica.	26
1.2.1.3.2. Estructura nubosa en imágenes de satélite.	26
1.2.1.4. Fase final.	28
1.2.1.4.1. Descripción meteorológica.	28
1.2.1.4.2. Estructura nubosa en imágenes de satélite.	30
1.2.1.5. Características adicionales.	31
1.2.2. Parámetros de diagnóstico.	32
1.2.2.1. Contornos de altura geopotencial (Z) en 200 hPa.	33
1.2.2.2. Contornos de altura geopotencial (Z) en 1000 hPa	33
1.2.2.3. Espesor equivalente.	34

1.2.2.4. Parámetro Frontal Térmico (PFT).	34
1.2.2.5. Temperatura en 500 hPa.	34
1.2.2.6. Vorticidad Potencial (VP).	35
1.2.2.7. Índice de Showalter (IS).	36
1.3. Tiempo asociado a una Depresión Aislada en Niveles Altos.	37
1.3.1. Tiempo asociado sobre superficie oceánica.	38
1.3.2. Tiempo asociado sobre tierra.	39
1.4. Corte vertical típico de una DANAs.	41
2. OBJETIVOS	45
3. DATOS	49
3.1. El reanálisis NCAR/NCEP.	52
3.2. Datos de estaciones de la red principal y secundaria del INM.	53
4. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DANAs	55
4.1. Revisión de métodos previos.	57
4.2. Parámetros de diagnóstico.	58
5. CLIMATOLOGÍA DE DANAs EN EL HEMISFERIO NORTE	75
5.1. Distribución espacial de DANAs en el hemisferio Norte.	78
5.1.1. Antecedentes.	78
5.1.2. Resultados.	81
5.2. Distribución temporal de DANAs en el hemisferio Norte.	88
5.2.1. Antecedentes.	88
5.2.2. Resultados.	91
5.3. Duración y trayectorias de las DANAs en el hemisferio Norte.	96
5.3.1. Antecedentes.	96
5.3.2. Resultados.	100

6. ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN Y NUBOSIDAD ASOCIADAS A DANAs EN LA PENÍNSULA IBÉRICA	111
6.1. Análisis de la Precipitación y Nubosidad en función de la Posición de las DANAs.	118
6.2. Análisis de la Precipitación y Nubosidad en función de las Regiones de Precipitación.	130
6.2.1. Tipo de precipitación en función de la situación de las DANAs.	131
6.2.2. Distribución geográfica de las DANAs según la zona en la cual provocan precipitación.	134
7. RESUMEN, CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA	141
8. REFERENCIAS	149
9. ANEXOS	161
- Anexo I: Figuras del capítulo 1	163
- Anexo II: Tablas del capítulo 3	185
- Anexo III: Figuras del capítulo 5	193
- Anexo IV: Figuras del capítulo 6	197

ACRÓNIMOS

AMJ: Abril, mayo y junio

CA: Advección de aire frío (*Cold Advection*)

CARDS: *Compressive Aerological Reference Data Set*

Cb: Cumulonimbos

COL: *Cut-off Low* (DANA en inglés)

COST: Proyecto de Cooperación Europea en el campo de investigación Científica y Técnica (*European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research*)

DANA: Depresión Aislada en Niveles Altos

EFM: Enero, febrero y marzo

EOF: Función ortogonal empírica (*Empirical Orthogonal Function*)

ξ : Vorticidad relativa

FMI: Instituto Meteorológico Finlandés (*Finnish Meteorogycal Intitute*)

hPa: hectopascales

IGRA: *Integrated Global Radiosonde Archives*

INM: Instituto Nacional de Meteorología

IR: Canal infrarrojo del satélite

IS: Índice de Showalter

JAS: Julio, agosto y septiembre

KD: Artículo de Kentarchos y Davies (1998)

KNMI: Real Instituto Meteorológico Holandés (*Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*)

mgp: metros geopotencial

NCAR: Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos (*National Center for Atmospheric Research*)

NCEP: Centro Nacional de Predicción Medioambiental de Estados Unidos (*National Center for Environmental Prediction*)

NE: punto cardinal noreste

NO: punto cardinal noroeste

OMM: Organización Meteorológica Mundial

OND: Octubre, noviembre y diciembre

PFT: Parámetro Frontal Térmico

P: DANAs de tipo ‘polar’

PRR: Punto de rejilla representativo

Pv: DANAs de tipo ‘*polar vortex*’

PV: Artículo de Price y Vaughan (1992)

S: DANAs de tipo ‘*subtropical*’

SE: punto cardinal sureste

SO: punto cardinal suroeste

STE: Intercambio entre estratosfera y troposfera (*Stratosphere-Troposphere Exchange*)

T: Temperatura

T_p : Temperatura potencial

θ_e : Temperatura potencial equivalente

u: Componente zonal del viento

UTC: Tiempo Universal Coordinado (*Universal Time Coordinated*)

UVP: Unidades de Vorticidad Potencial

VALIMOD: Proyecto de “Validación climática de modelos conceptuales a escala sinóptica, compatibilidad con regímenes cuasiestacionarios de circulación y efectos sobre el tiempo de la Península Ibérica”

VIS: Canal visible del satélite

VP: Vorticidad potencial

WA: Advección de aire cálido (*Warm Advection*)

WV: Canal de vapor de agua del satélite (*Water Vapour*)

Z: Altura geopotencial

ZAMG: Instituto Meteorológico y Geofísico Austriaco (*Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*)

Capítulo 1:

Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MODELO CONCEPTUAL. DEFINICIÓN

Un modelo conceptual es una descripción del esquema fundamental de un fenómeno meteorológico y una identificación de los principales procesos físicos y dinámicos de un sistema de tiempo concreto (Winkler et al., 2001). Los modelos conceptuales fueron descritos inicialmente a finales de los años 80. Hasta la fecha se han identificado y descrito alrededor de ochenta en innumerables libros y artículos, tales como Browning (1985), Newton y Holopainen (1990), Bluestein (1992, 1993) y Carlson (1998), y en particular en un proyecto intergubernamental de cooperación europea denominado '*Implementation of an European Research Action on the Development of Nowcasting Techniques*' (Action 78) integrado en el programa COST (*European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research*). Su principal objetivo fue perfeccionar los métodos y sistemas de 'nowcasting' y el desarrollo de nuevas técnicas que mejorasen las anteriores, aprovechando las ventajas de las últimas tecnologías en computación y los recientes avances en metodologías meteorológicas (Conway et al., 1996).

Hacia finales de los años 90 comenzó la compilación de un manual de los modelos conceptuales mejor definidos y aceptados en el mundo científico (tabla 1.1) denominado '*Manual of Synoptic Satellite Meteorology – Conceptual Models*', (Winkler et al., 2001). Inicialmente fue elaborado por el instituto meteorológico austriaco (ZAMG), con la cooperación posterior de los institutos meteorológicos holandés y finlandés (KNMI y FMI).

Un modelo conceptual completo debe consistir en:

- a) una definición del fenómeno en términos de patrones reconocibles por medio de observaciones, análisis o simulaciones
- b) una descripción de su ciclo de vida en términos de apariencia, tamaño, intensidad y tiempo presente que lo acompaña
- c) una identificación de los fenómenos físicos que determinan la formación y evolución de la estructura

- d) una especificación de los campos clave que definen los procesos principales
- e) una guía para la predicción de las condiciones y situaciones meteorológicas usando los campos de diagnóstico y pronóstico que discriminen su desarrollo o no
- f) una guía para la predicción del desplazamiento y evolución de la estructura.

Los modelos conceptuales facilitan: 1) una síntesis de la información disponible, 2) una base para aislar fenómenos de tiempo presente y para extraer las señales principales de patrones complejos, 3) una herramienta de apoyo a la predicción numérica, 4) un complemento en la predicción de fenómenos sinópticos y mesoscales y 5) un complemento esencial en la predicción a muy corto plazo y en la predicción de fenómenos severos.

1.2 DEPRESIONES AISLADAS EN NIVELES ALTOS

Las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs) –denominadas en inglés *Cut-off Lows (COLs)*- son vórtices ciclónicos aislados en la media y alta troposfera desarrollados a partir de vaguadas profundas en la circulación general del oeste, según las definen Palmen (1949), Palmen y Newton (1969) y Winkler et al. (2001). Sus propiedades meteorológicas son suficientemente conocidas (Matsumoto y Ninomiya, 1967; Matsumoto et al., 1982; Hill y Browning, 1987; Degorska, 1980) En mapas isobáricos las DANAs son fácilmente reconocibles como contornos cerrados de geopotencial (Z), que en su fase final se aíslan de la circulación principal del oeste, con una persistencia de pocos días, aunque en ciertos casos pueden llegar a durar más allá de tres semanas (Bamber et al., 1984; Hoskins et al., 1985; Price y Vaughan, 1992). La conexión entre los sistemas de depresiones aisladas en niveles altos y la vorticidad potencial isoentrópica es fuerte según afirman Hoskins et al. (1985), Hoskins (1991) y Price y Vaughan (1993). En términos dinámicos las DANAs constituyen centros aislados de alta vorticidad potencial (VP) en superficies isoentrópicas que provocan el intercambio entre la alta troposfera y la baja estratosfera (STE) (Hoskins et al., 1985). Las DANAs son

FRENTE FRÍO	SUBESTRUCTURAS EN FRENTES Y ESTADOS INICIALES DE CICLOGÉNESIS
Frente frío	Onda
Frente frío en advección fría	Onda en altura
Frente frío en advección cálida	Bajas secundarias en bandas nubosas por oclusión
Frente dividido	Ciclogénesis explosiva
Frente frío ártico	Intensificación del frente por cruce del <i>jet</i>
FRENTE CÁLIDO	Decaimiento del frente
Frente cálido en banda	
Frente cálido en escudo	
Frente cálido separado	
OCLUSIÓN	FENÓMENOS A MESOESCALA
Oclusión tipo <i>Conveyor Belt</i> cálido	Cúmulos intensificados
Oclusión tipo <i>Conveyor Belt</i> frío	Coma
Oclusión instantánea	Nubosidad del jet (fibrosa)
Desarrollo en aire frío	Nubosidad por convergencia
Oclusión doblada hacia atrás	Baja polar
DESARROLLO BAROCLINO	NUBES BAJAS
Desarrollo baroclinio	Mantos de estratocúmulos
FENÓMENOS NO FRONTALES A ESCALA SINÓPTICA	Nieblas y estratos
<i>Conveyor Belt</i> cálido	Calles de nubes
Nubosidad de la dorsal de espesores	
Depresión Aislada en Niveles Altos (DANAS)	
Bandas de deformación	
ESQUEMAS DE TIEMPO OROGRÁFICO	ESTRUCTURAS DE VAPOR DE AGUA
Nubosidad de estancamiento	Remolinos en vapor de agua
Nubosidad a Sotavento	Ojo en vapor de agua
Föehn	Rayas secas
Efectos orográficos en nubes frontales	
Desacoplamiento de capas nubosas en diferentes alturas	
Retraso del frente debido a montañas	
MODELOS CONCEPTUALES DE PEQUEÑA ESCALA	CARACTERÍSTICAS DE FENÓMENOS CONVECTIVOS
Convergencia costera	Cumulonimbos y sistemas convectivos a mesoescala
Líneas de convergencia inducidas orográficamente	Cluster de cumulonimbos
Líneas de convergencia no-orográficas	Características de nubosidad convectiva en entornos típicos sinópticos
Líneas de convergencia sobre mar y lagos	Condiciones de buen tiempo
Brisa de mar	Sector cálido
	Sector cálido: penacho español
	Borde delantero de la banda nubosa frontal
	Centro y parte trasera de banda nubosa frontal
	Centro y parte trasera de bandas nubosas frontales: aumento de la convección por vorticidad potencial

Tabla 1.1: Modelos conceptuales definidos en el ‘Manual of Satellite Meteorology Conceptual Models’ elaborado por el ZAMG y en cooperación con el KNMI y el FMI.

un importante mecanismo de intercambio estratosfera-troposfera (Bamber et al., 1984; Holton et al. 1995, Kim et al. 2002), el desarrollo de las DANAs juega un papel esencial en el contenido de ozono troposférico (Vaughan y Price, 1989; Ancellet et al. 1994), tanto en latitudes medias de ambos hemisferios (Oltmans et al., 1992; Barsby y Diab, 1995; Gimeno et al., 1998) como en la región subtropical en general (Cuevas et al., 2000; Kentarchos et al., 2000; Baray et al. 2003). Se caracterizan por el hundimiento de la tropopausa en su parte central, lo que origina zonas con valores altos de vorticidad potencial en su interior, conocidas como '*middle world*', donde las líneas isoentrópicas cruzan la tropopausa. Una tropopausa anómalamente baja ayuda a que se produzca STE por erosión convectiva o erosiva de la tropopausa, aunque hay otros dos posibles mecanismos de STE: mezcla turbulenta cerca del *jet* asociado con un sistema de DANA, o por hundimiento de la tropopausa a lo largo del sistema (Hoskins et al., 1985; Shapiro et al., 1986; Price y Vaughan, 1993 y Wirth, 1995), de un modo similar a como ocurre, aunque a escala menor, en ciclogénesis en niveles altos. El aire en el interior de la DANA (Borchi y Marenco, 2002) es más frío que la región que lo rodea, debido a que se forma en latitudes más altas, por lo que la génesis de una DANA en latitudes medias puede verse como un desplazamiento de una región de alta vorticidad potencial desde su confinamiento en zonas polares. La escala de la DANAs es generalmente más pequeña que los ciclones extratropicales en su fase de madurez. La profundidad típica del centro de máxima vorticidad potencial es del entorno de 2-3 km. Su intensidad es mayor en la alta troposfera y decrece cuando se desciende en la vertical, siendo posible incluso encontrar circulación antíclónica en superficie.

Muchos de estos patrones de variables meteorológicas (baja cerrada en altura, mínimo de temperatura y contorno cerrado en el campo de espesor) son comunes a lo que se denominó desde finales del siglo XIX como '*cold air pool*' en inglés, '*Kaltlufttropfen*' en alemán o "gota fría" en castellano. Los primeros trabajos sobre '*cold air pools*' se remontan a Köppen (1886) y las tres características ya comentadas ya las describió Scherhag (1937, 1939, 1948). Bajo esta definición se hicieron algunos trabajos de caracterización de estos sistemas (Besse et al., 1979; Hardman, 1983; Jansá, 1964; Malberg, 1985) e incluso algún estudio climatológico (Llasat, 1987, Llasat y Puigcerver, 1990 y Llasat, 1991). No obstante, es importante recalcar que aunque comparten

algunas características con las DANAs, y muchos ‘cold air pool’ de hecho son DANAs, no son exactamente lo mismo; pues el concepto de DANAs hace referencia al mecanismo de formación, es decir, al hecho de aislarse una baja de la circulación general de oestes, así conviene comentar cómo se desarrolla una DANAs.

El desarrollo de una DANAs depende de la existencia de inestabilidad en la circulación general en niveles altos de la troposfera. Un rasgo característico es que las ondas de temperatura (T) se encuentran retrasadas con respecto a las ondas de geopotencial (Z) (figura 1.1).

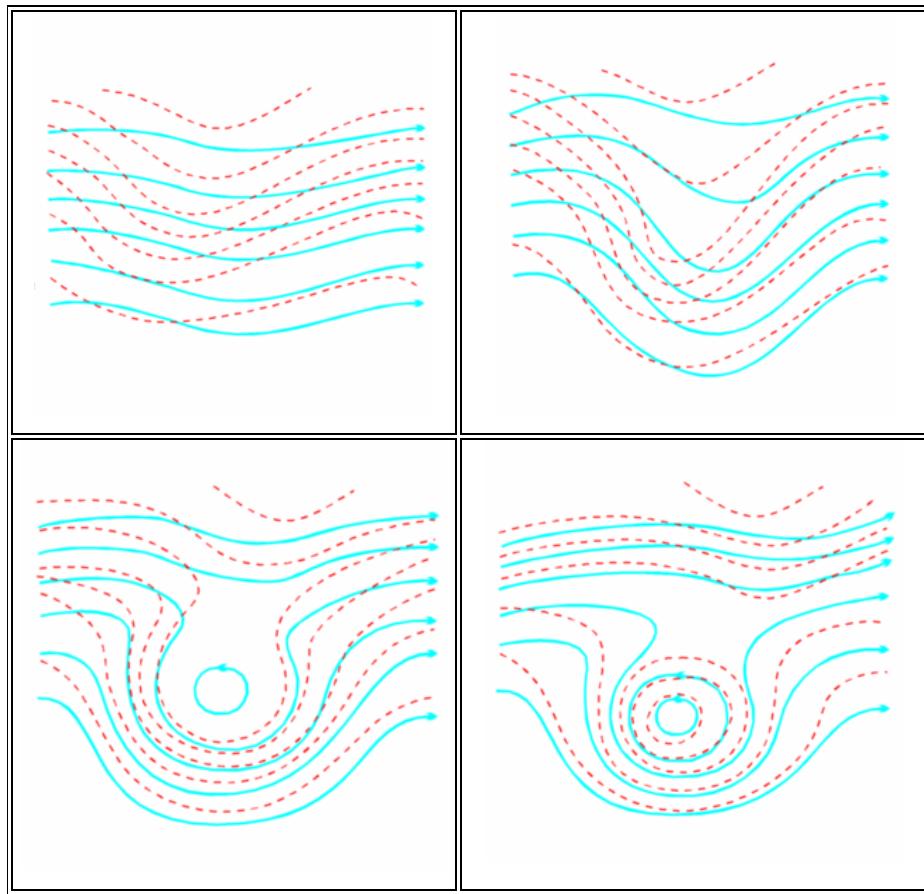


Figura 1.1: Desarrollo de una DANAs. Ondas de temperatura (líneas punteadas rojas) retrasadas con respecto a las líneas de altura geopotencial (líneas continuas azules) en las primeras fases de desarrollo de la DANAs.

Debido a este desplazamiento de fase, se observan dos rasgos característicos:

1.- El campo de advección de temperatura muestra una advección de aire frío (CA) en el área de la vaguada y advección de aire cálido (WA) en la dorsal del campo de geopotencial.

2.- El eje de la vaguada tiene una inclinación hacia atrás con la altura.

1.2.1 Ciclo de vida de una DANA

El desarrollo clásico del ciclo de vida de una DANA se puede dividir en cuatro fases:

- Desarrollo de una vaguada en niveles altos
- Ruptura (término en inglés ‘tear-off’)
- Aislamiento (término en inglés ‘cut-off’)
- Fase final

1.2.1.1 Desarrollo de una vaguada en niveles altos:

1.2.1.1.1 Descripción Meteorológica

Para el desarrollo de una DANA se necesita tener ondas con suficiente inestabilidad potencial en la troposfera. Como ya se ha dicho, el campo de temperatura se caracteriza por una onda de temperatura retrasada con respecto a una onda de neopotencial. De este modo es posible encontrar advección de aire frío (CA) en el interior de la baja en altura. Durante esta fase se observa un incremento en la amplitud de las ondas de geopotencial y, a veces, un decrecimiento de su longitud de onda. Este mismo desarrollo tiene lugar para las ondas de temperatura. En el hemisferio Norte se puede observar una desviación hacia el sur de las isohipsas y las isotermas de la DANA, adelantándose a la profundización de la vaguada.

1.2.1.1.2 Estructura Nubosa en Imágenes de Satélite

Para completar la definición de la estructura y comprensión de las DANAs se analiza la estructura nubosa observada a partir de imágenes de satélite. La estructura nubosa en los canales de satélite de infrarrojo (IR), visible (VIS) y vapor de agua (WV) –tabla 1.2 (Bader et al., 1995; Carlson, 1987)- es indicativa del estado del ciclo de vida de la estructura que estudiamos.

	Rango Espectral (μm)	Parámetros Analíticos	Apariencia
VIS	0.4 - 1.1	Mide la radiación solar reflejada o albedo de un cuerpo	Zonas blancas → Alta reflectividad → Mayor Espesor Zonas oscuras → Baja reflectividad → Menor Espesor
IR	10.5 – 12.5	Proporciona un mapa térmico de la atmósfera en el que se visualizan temperaturas de brillo y por tanto también la altura de la cima nubosa	Zonas blancas → Temperatura baja → Topes Altos Zonas oscuras → Temperatura alta → Topes Bajos
WV	5.7 - 7.1	Nos da información sobre la cantidad y distribución de vapor de agua en la atmósfera	Zona negra → Zona Seca Zona gris claro o blanca → Capa húmeda Manchas lechosas → Nubes altas

Tabla 1.2: Fundamentos de los tres principales canales de un satélite geoestacionario.

En este primer estado de profundización de la vaguada en niveles altos ya existe una pronunciada banda nubosa por delante de su eje. Las imágenes de satélite en esta fase muestran una banda nubosa frontal bien definida en la parte delantera de la baja en altura. En las imágenes del canal visible e infrarrojo la banda nubosa es blanca, indicando una nubosidad espesa y multicapa. En la parte posterior de la vaguada puede existir nubosidad fibrosa que normalmente está conectada con el frente cálido que la precede (figura 1.2). En contraste con la banda nubosa frontal, estas nubes fibrosas son nubes altas y sólo pueden ser detectadas mediante imágenes de satélite del

canal IR y del de vapor de agua. Las imágenes de WV muestran dos zonas de aire húmedo (bandas gris claro en WV) que están situadas en la parte delantera y trasera de la vaguada. El centro de la vaguada, en torno al eje, se caracteriza por la presencia de aire seco, que aparece en negro en las imágenes de WV. También puede existir nubosidad formada por aire frío en altura, pero no es reconocible en las imágenes de WV.

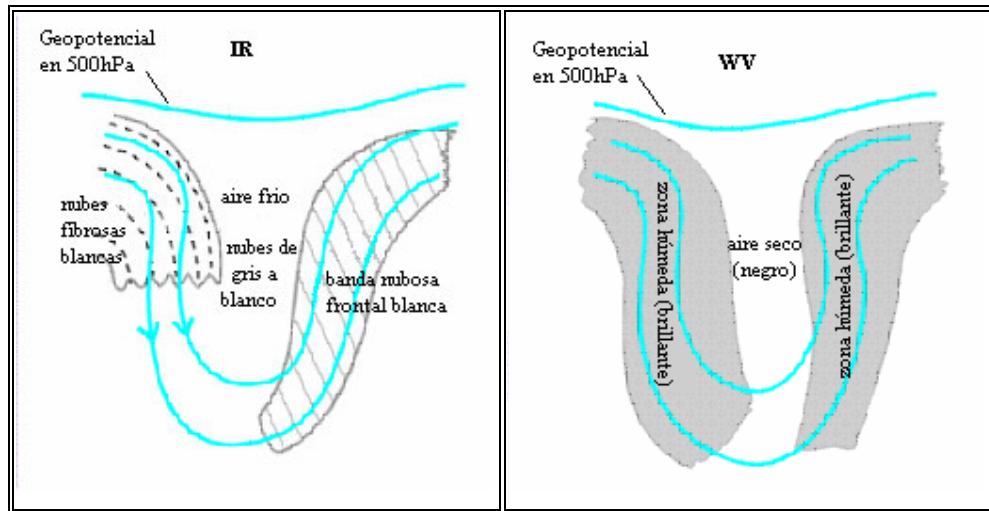


Figura 1.2: Esquema de la primera fase del ciclo de vida de una DANA -desarrollo de una vaguada en niveles altos de la troposfera- en los canales IR y de WV. Las líneas azules representan el campo de geopotencial y las zonas en gris distintos tipos de nubosidad.

1.2.1.2 Ruptura ('Tear-Off'):

1.2.1.2.1 Descripción Meteorológica

Para este estado de desarrollo de la DANA las isohipsas toman forma de omega invertida en los niveles medios de la troposfera (por ejemplo dentro del campo de geopotencial en 500 hPa). El proceso meteorológico más importante que tiene lugar durante esta fase es el comienzo de la separación de la vaguada de la circulación meridional. Como consecuencia del incremento adicional de la amplitud de las ondas (aumento de la profundidad de la vaguada) el aire frío procedente de las regiones del norte se aísla del flujo polar y el aire templado de regiones más meridionales puede moverse hacia el norte debido a que se aísla del flujo general subtropical. El resultado de este proceso

es el desarrollo de una baja fría en niveles altos en la parte inferior de la vaguada. La circulación de la baja se caracteriza por isohipsas cerradas y un vórtice en el campo de vientos en el nivel de 500 hPa. De todos modos, en esta fase la baja aún se encuentra en sus estados iniciales y por lo tanto su intensidad es débil y el flujo en niveles altos todavía sigue la forma de omega invertida de las isohipsas.

1.2.1.2.2 Estructura Nubosa en Imágenes de Satélite

En esta fase, la vaguada en niveles altos se vuelve más pronunciada, para terminar separándose de la corriente general del oeste. Se caracteriza por la ruptura de la banda nubosa frontal en la parte noreste de la vaguada (área que se denomina ‘tear off’ en las figuras 1.3 siguientes). Esta parte de la banda nubosa frontal es la que permanecerá en la parte delantera de la DANA y se curvará ciclónicamente. En algunos casos la curvatura ciclónica de la nubosidad también se desarrolla en la parte trasera de la vaguada en altura. Esta nubosidad es causada principalmente por convergencia en niveles medios y altos de la troposfera. Se puede reconocer en las imágenes de IR como una banda nubosa de tono gris claro a blanco, mientras que en el canal visible se distingue por un color de gris oscuro a gris. El canal de WV muestra una inequívoca curvatura ciclónica de aire húmedo. Además, el aire frío que se encuentra en el centro de la vaguada se reconoce como una zona de tonos oscuros, de gris a negro, lo que indica la existencia de aire seco, e incluso algunas veces, es indicativo de la entrada de aire estratosférico. Mientras la estructura nubosa en el canal IR se restringe al área de ruptura de la DANA, la imagen en el canal de WV se caracteriza por la extensión de la nubosidad a otras áreas, mostrando así las fuentes de humedad.

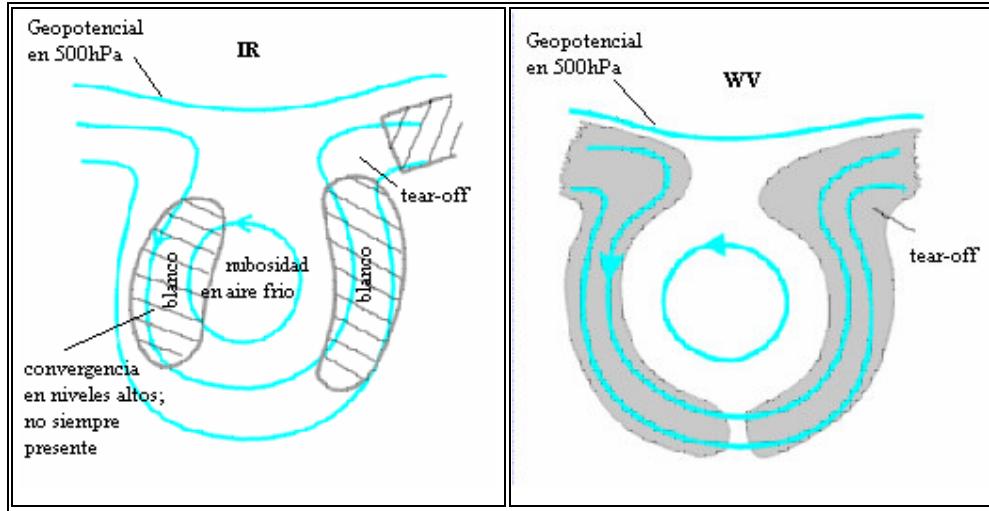


Figura 1.3: Esquema de la segunda fase del ciclo de vida de una DANA – ruptura- en los canales IR y WV. Las líneas azules representan el campo de geopotencial y las zonas en gris distintos tipos de nubosidad.

1.2.1.3 Aislamiento ('Cut-Off'):

1.2.1.3.1 Descripción Meteorológica

En contraste con el estado anterior de ruptura ('tear-off'), la separación de la estructura de la DANA finaliza y la DANA es mucho más pronunciada. El campo de vientos en 500 hPa muestra una circulación ciclónica cerrada bien definida y desarrollada en el área de formación de la vaguada que, en el caso de una DANA ideal, se separaría totalmente de la circulación meridional general, quedando aislada de ésta.

1.2.1.3.2 Estructura Nubosa en Imágenes de Satélite

En esta fase la curvatura ciclónica de ambas bandas nubosas se hace más fuerte. En las imágenes de WV habitualmente se observa una espiral ciclónica hasta el centro de la DANA (figura 1.4).

En el anexo I en la imagen I.1. (a, b y c) se muestran unas imágenes de satélite donde pueden reconocerse las tres fases de desarrollo de una DANA.

La primera imagen (a) muestra la primera fase -comienzo del desarrollo de una vaguada en niveles altos-, la segunda (b) el estado de ruptura y la tercera (c) la fase de aislamiento.

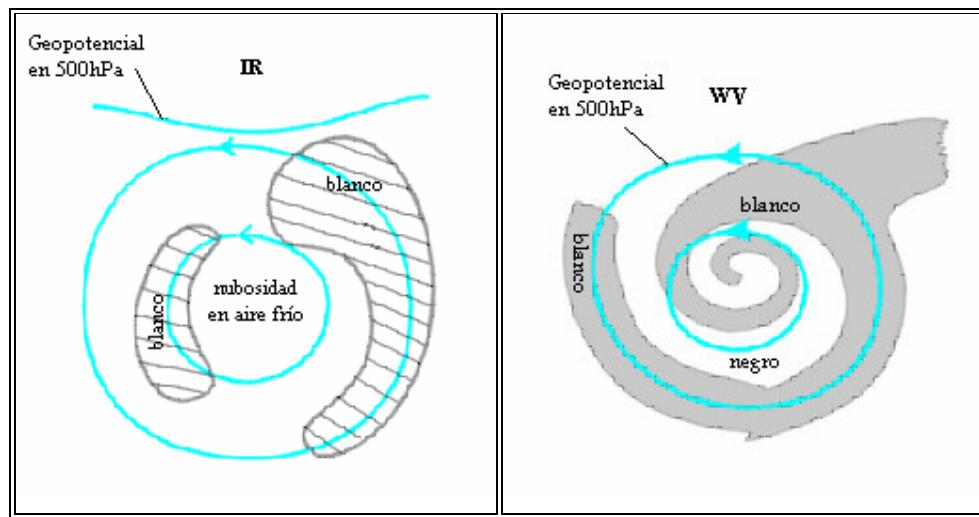


Figura 1.4: Esquema de la tercera fase del ciclo de vida de una DANA -aislamiento- en los canales IR y de WV. Las líneas azules representan el campo de geopotencial y las zonas en gris distintos tipos de nubosidad.

El cambio de temperatura que tiene lugar durante la formación de una DANA está causado por advección horizontal y por calentamiento adiabático por descenso de aire frío. En el caso de una DANA ya desarrollada la temperatura del aire en su interior permanece constante o incluso sufre descensos.

Los procesos adiabáticos desde superficie (por ejemplo, desde una superficie oceánica cálida o desde niveles bajos de la DANA) causan dos efectos:

1.- Inestabilidad en el núcleo de la DANA, lo que precede al desarrollo de nubosidad convectiva. Las áreas más inestables donde tiene lugar esta actividad convectiva más severa son, principalmente, el centro de la baja -donde se forma nubosidad en aire frío- y la parte delantera de la baja -en el área de la dorsal de espesores-.

2.- Calentamiento continuo del aire frío del centro de la DANA y como consecuencia de esto, descenso del gradiente de temperatura entre el centro y los alrededores. Esto trae como resultado el debilitamiento progresivo de la circulación ciclónica y su posterior desaparición.

El desplazamiento de una DANA es muy lento y por lo tanto en muchas ocasiones puede interpretarse como cuasiestacionario. Como término medio el tiempo de vida al que se ve limitada una DANA, hasta que la baja se ve afectada por el calentamiento adiabático y se destruye la estructura, es de tres o cuatro días.

1.2.1.4 Fase final:

1.2.1.4.1 Descripción Meteorológica

En el interior de la DANA existen fenómenos convectivos, a menos que la superficie sobre la que se forme sea muy fría. El aire cerca de la superficie es cálido y la circulación ciclónica se propaga hacia niveles inferiores lentamente por fricción. La convección ocasiona la entrada de aire cálido y el efecto de la fricción se intensifica. Consecuentemente la DANA se debilita lentamente. En muchos casos la DANA se fusiona de nuevo con la circulación general antes de deshacerse completamente por la convección. Normalmente una nueva vaguada en la circulación general se acerca por la parte trasera de la DANA y la atrapa en su flujo. Antes de desaparecer la DANA completamente, ésta aparece como una pequeña onda en el interior de la vaguada durante un periodo corto de tiempo. También se puede fusionar con otra DANA y será esta combinación de DANAs la que se una luego a la circulación general.

Si la DANA está lejos del flujo y éste no la puede atrapar, sólo desaparece por convección. Este desarrollo ocurre principalmente en las áreas más al sur; en Europa puede encontrarse sobre el mar Mediterráneo.

Sobre una superficie muy fría la convección no se desencadena. En estos casos las DANAs no se podrán disolver hasta que sean capturadas por la

circulación general o hasta que en su recorrido encuentre una superficie más cálida.

En la figura 1.5 se esquematiza el proceso de captura de una DANA por la circulación general. En la imagen I.2.(a, b y c) del anexo I se pueden ver

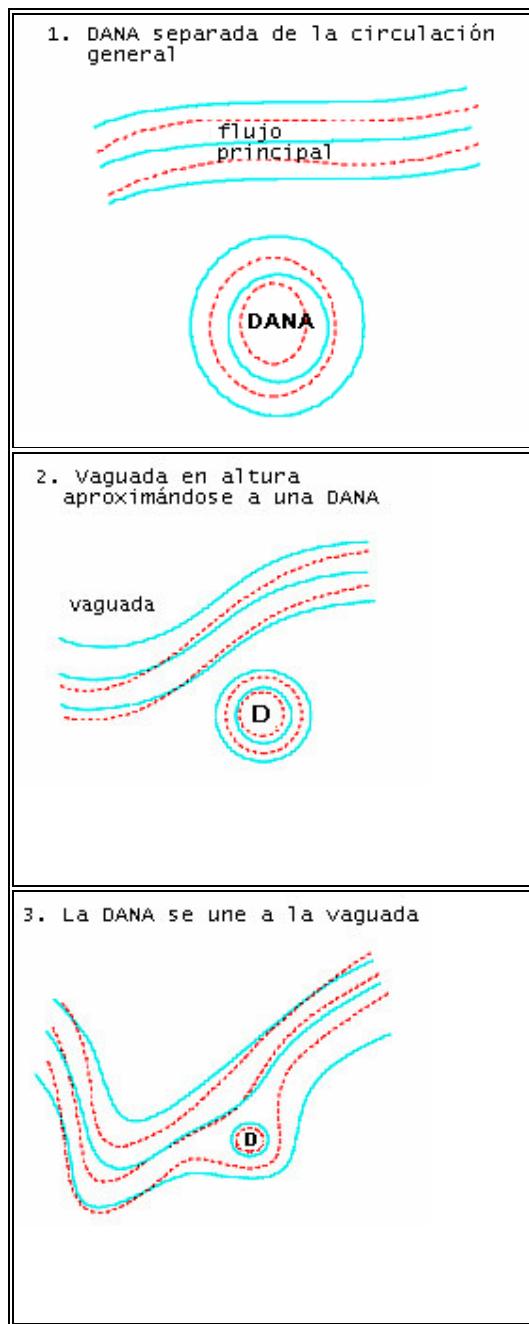


Figura 1.5: Esquema de la cuarta fase del ciclo de vida de una DANA -“fase final”. Las líneas azules representan el campo de geopotencial y las rojas punteadas las isolíneas de temperatura, ambas en el nivel de 500 hPa.

imágenes de satélite del canal infrarrojo donde se observa este paso final del ciclo de vida de una DANA.

Si la baja en altura es grande, la baroclinidad es fuerte y la superficie sobre la que se encuentra es cálida, se produce desarrollo barocílico en el borde delantero de la DANA, con formación de pequeños ciclones embebidos. Habitualmente se desarrollan muchos ciclones unos después de otros. Esta gran baja en altura se debilita gradualmente y finalmente el flujo general captará los restos de estos ciclones.

Este tipo de desarrollo se produce en el entorno de un 15% del total de casos de DANAs y su duración típica es de 3 a 10 días.

En la imagen I.3.(a, b ,c y d) del anexo I pueden verse imágenes IR del satélite Meteosat donde se observa un ejemplo de desarrollo barocílico de una DANA.

La fase de disolución de una DANA está habitualmente ligada a dos procesos. Como se describe en párrafos anteriores, uno de ellos se debe al calentamiento adiabático. El segundo está causado por los componentes ageostróficos del campo de viento, que transportan aire cálido (húmedo) hacia el centro de la baja. Ambos procesos meteorológicos llevan a una disminución del gradiente de temperatura y por lo tanto a la disolución de la DANA.

1.2.1.4.2 Estructura Nubosa en Imágenes de Satélite

En la fase final del ciclo de vida, la DANA normalmente se fusiona con una vaguada en altura de gran tamaño en el flujo general zonal (figura 1.6). También es posible que la DANA sea prácticamente estacionaria y se disuelva mientras permanece inmóvil (este tipo de desarrollo es muy raro que ocurra sobre Europa).

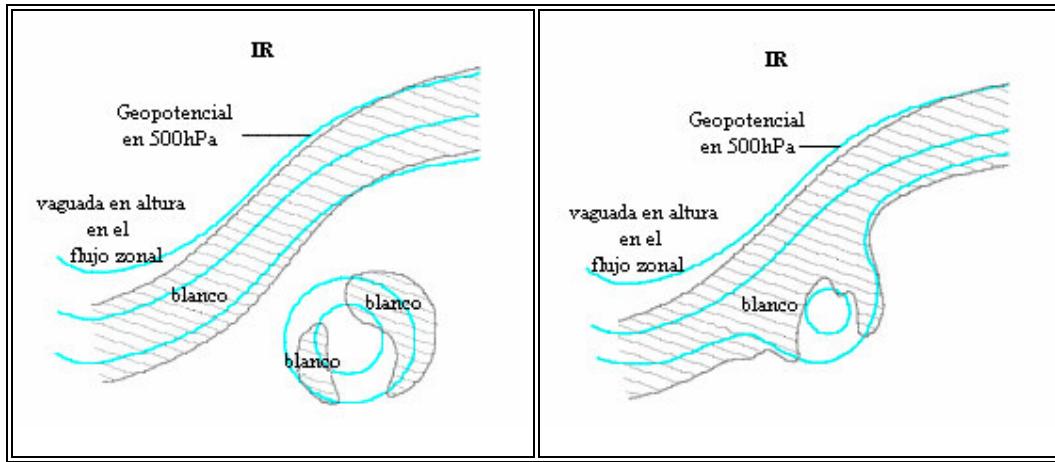


Figura 1.6: Esquema de la cuarta fase del ciclo de vida de una DANA -fase final- en el canal IR. Las líneas azules representan el campo de geopotencial y las zonas en gris la nubosidad.

1.2.1.5 Características adicionales

Como consecuencia de la inestabilidad potencial de la troposfera se desarrollan células convectivas dentro del interior de la DANA. Sobre el océano la nubosidad es más intensa y por el contrario sobre tierra suele existir una zona de nubosidad más extensa y continua con células convectivas embebidas (figura 1.7).

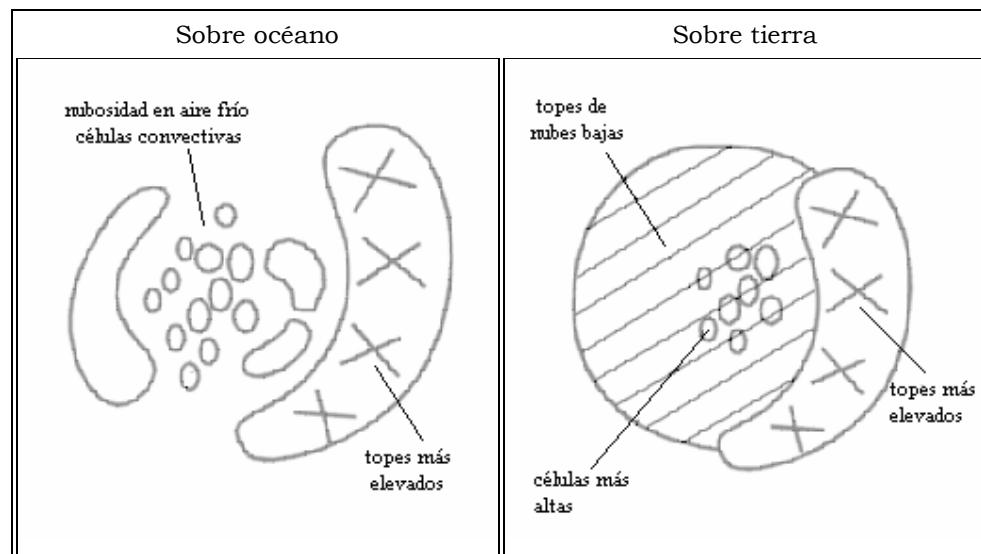


Figura 1.7: Esquema de la nubosidad que se forma en las distintas partes de una DANA dependiendo de si el desarrollo tiene lugar sobre superficie oceánica o sobre tierra.

Al mismo tiempo que tiene lugar el proceso de ruptura se desarrollan circulaciones ciclónicas secundarias en el interior de la circulación ciclónica principal (figura 1.8), las mismas tienen una escala menor y suelen estar relacionadas con “ojos de vapor de agua” (zonas muy oscuras (muy secas) de pequeña escala –denominadas como “ojos” (‘eye’ en su término inglés)- en las imágenes de satélite del canal de WV. Se desarrollan en los bordes de ondas a muy pequeña escala que se vuelven inestables y finalmente forman el “ojo”. Los “ojos de vapor de agua” son áreas que contienen aire muy seco que penetra en las bajas en altura y por tanto las vuelve cada vez más secas. Bajo estas circunstancias el aire seco es capaz de disolver la nubosidad asociada a la baja y formar áreas ciclónicas de pequeña escala en el manto de nubes del centro de la DANA.

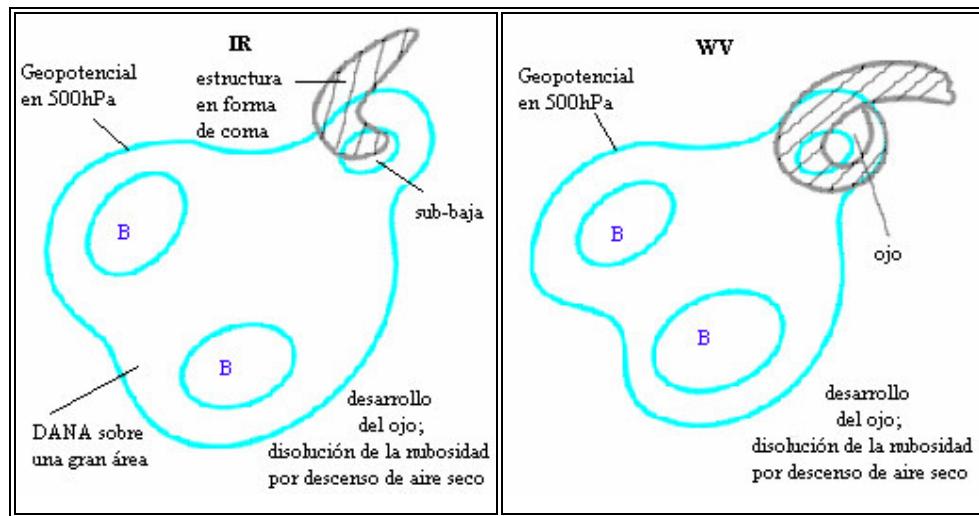


Figura 1.8: Esquema del proceso de formación de circulaciones ciclónicas secundarias de escala menor en el interior de la circulación ciclónica principal.

1.2.2 Parámetros de diagnóstico

En este apartado se describen los diferentes parámetros de diagnóstico utilizados habitualmente para la identificación y caracterización de las depresiones aisladas en niveles altos. El modelo conceptual de DANA responde a las características que a continuación se describen:

1.2.2.1.- Contornos de altura geopotencial (Z) a 200 hPa: durante la fase inicial la topografía en 200 hPa muestra una vaguada. En el resto de las fases del desarrollo de la DANA, como se dijo anteriormente, las líneas del campo irán tomando forma de omega invertida, paso previo a la formación de una circulación ciclónica cerrada aislada en la parte inferior de la vaguada.

1.2.2.2.- Contornos de altura geopotencial (Z) a 1000 hPa: mientras en los niveles altos de la troposfera se detecta o empieza a definirse una baja o una vaguada profunda, en superficie en el campo de geopotencial puede no distinguirse rasgo alguno de ésta. El gradiente de geopotencial es generalmente débil, sin circulación ciclónica. Durante las fases finales del desarrollo puede aparecer una circulación ciclónica muy débil incitada por la circulación en los niveles superiores de la troposfera.

En la siguiente figura (figura 1.9) se representan estos campos para las tres fases diferentes del desarrollo del sistema. Se puede ver como sólo en la fase final de desarrollo de la DANA se detecta circulación ciclónica en la superficie de 1000 hPa, mientras que en las fases anteriores existe circulación curvada o cerrada en altura y no existe señal en superficie.

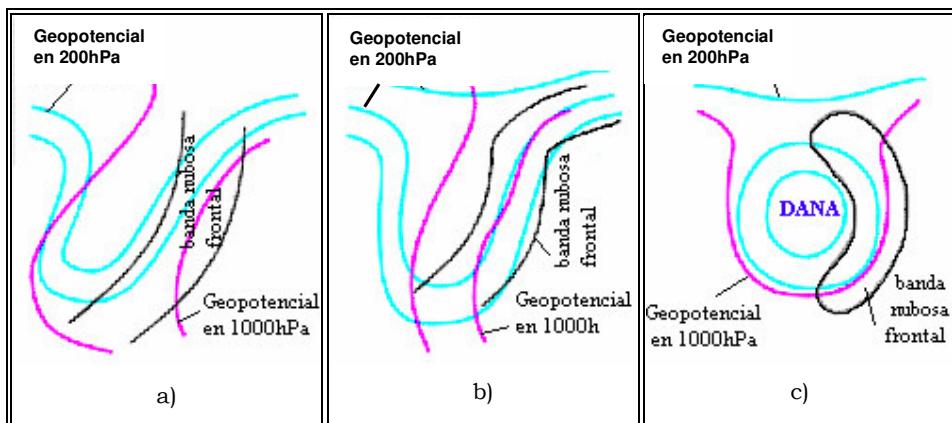


Figura 1.9: Evolución de los campos de geopotencial en los niveles de 200 hPa (líneas de color azul) y de 1000 hPa (líneas de color magenta), así como de la banda nubosa frontal asociada a la DANA, durante las fases de desarrollo de la vaguada en niveles altos (a), ruptura (b) y aislamiento (c). [En el anexo I imagen 4 (a, b y c) se encuentran las imágenes de satélite del canal IR donde se representan los mismos campos].

1.2.2.3.- Espesor Equivalente: este campo se caracteriza por un fuerte gradiente de espesores alrededor de la baja, con mayor incidencia en la parte delantera, y con un mínimo pronunciado detrás o en su centro (figura 1.10).

1.2.2.4.- Parámetro frontal térmico (PFT): el PFT es un parámetro muy utilizado para el análisis y localización de frentes, ya que sus valores máximos marcan los puntos donde se produce el cambio de temperatura en un frente. Básicamente el PFT es el cambio del gradiente de temperatura en la dirección del gradiente de temperatura (función frontogenética de Pettersen – Pettersenn, 1936-). En el caso de las DANAs se detectan líneas de pronunciado PFT en las fronteras, especialmente en la parte delantera, donde se encuentra una banda nubosa frontal (figura 1.10).

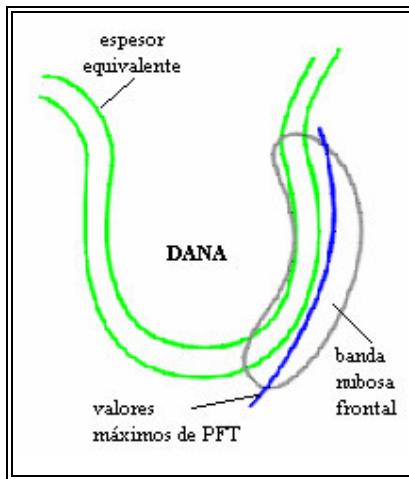


Figura 1.10: Esquema ideal de una DANA para los campos de espesor equivalente (líneas en color verde), la zona correspondiente a los máximos de PFT (línea azul) entre 200 y 300 hPa y la banda nubosa frontal asociada. [En la figura 5 del anexo I se encuentra la imagen de satélite correspondiente a este esquema].

1.2.2.5.- Temperatura en 500 hPa: el aire en el interior de la DANA es más frío que en sus alrededores. El campo de temperatura muestra un ciclo de vida similar al campo de geopotencial en altura (Griffiths et al., 1998).

En la figura 1.11 se observa el comportamiento paralelo de los campos de temperatura y de geopotencial en las diferentes fases de desarrollo de la DANA, excepto en el desarrollo de la vaguada –inicio del ciclo de vida- en la cual las isotermas se encuentran retrasadas con respecto a las de geopotencial, tal y como se señaló anteriormente.

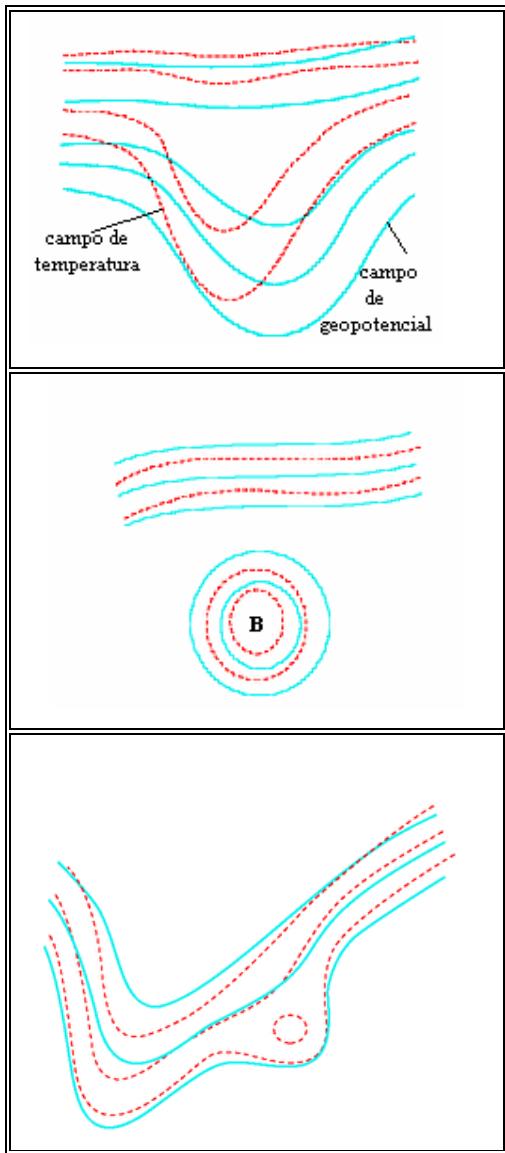


Figura 1.11: Esquema ideal de una DANA para los campos de geopotencial (líneas azules) y temperatura (líneas punteadas rojas), ambos en el nivel de 500 hPa para las fases de desarrollo de la vaguada en altura, aislamiento y fase final. [En el anexo I figura 6 se encuentran las imágenes IR del Meteosat correspondientes a la misma fase de evolución del sistema en niveles altos de la troposfera].

1.2.2.6.- Vorticidad potencial (VP): en el centro de la DANA el valor de la vorticidad potencial es máximo (figura 1.12), lo que implica un máximo en la vorticidad y en la estabilidad estática, es decir, un giro ciclónico y subsidencia en el corazón de la baja, por lo que se detecta una circulación ciclónica cerrada de aire estratosférico y la troposfera se encuentra más baja que en su entorno (Morgan y Nielsen-Gammon, 1998; Nielsen-Gammon, 2001).

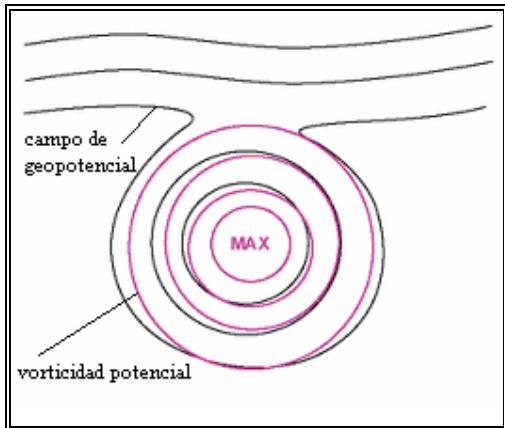


Figura 1.12: Representación esquemática de una DANA ideal aislada señalando los contornos de geopotencial (negro) y los de vorticidad potencial (magenta). [En el anexo I figura 7 se encuentra la imagen IR del Meteosat correspondiente a este esquema].

La troposfera bajo la DANA se desestabiliza debido a la necesidad de mantener un balance entre el campo de vientos y el de temperatura. Como consecuencia de este proceso la DANA puede tener regiones de fuerte convección que aportan un suplemento de aire cálido y humedad suficiente desde superficie.

1.2.2.7.- Índice de Showalter (IS): el índice de Showalter es un índice de validación objetiva de la inestabilidad que se calcula como:

$$IS = T_{500} - Tp_{500}$$

donde T_{500} es la temperatura en 500 hPa y Tp_{500} temperatura potencial de una burbuja de aire que asciende desde el nivel de 850 hPa. Cuanto mayor es el valor positivo de este índice, mayor será la estabilidad local. Por otra parte, grandes áreas inestables, corresponden a grandes valores negativos del índice (tabla 1.3).

IS	Grado de inestabilidad
>3	Estabilidad atmosférica
1 < IS < 3	Inestabilidad media
-2 < IS < 1	Inestabilidad
-6 < IS < -2	Muy inestable
IS < -6	Inestabilidad extrema

Tabla 1.3: Valores del índice de Showalter y su relación con la estabilidad presente en la atmósfera.

Para las DANAs se encuentran regiones por debajo de 3 unidades particularmente en dos áreas, en el centro de la baja -centro de convección- y en la parte delantera del centro de la baja, en el área de la dorsal de espesores, donde existe una fuerte actividad convectiva (Davidson et al, 2001).

1.3 TIEMPO ASOCIADO A UNA DEPRESIÓN AISLADA EN NIVELES ALTOS

Bajo las DANAs la troposfera es habitualmente inestable y pueden ocurrir fenómenos convectivos severos. Esto implica situaciones de predicción compleja, pues los fenómenos meteorológicos que originan dependen mucho de la orografía y sobre todo de la ausencia o presencia de una superficie marina cálida que permita o inhiba la convección (Georgiev y Martín, 2003; Qi y Leslie, 2003). Las DANAs pueden originar precipitaciones de intensidad moderada o fuerte sobre áreas extensas, particularmente bajo el flanco situado al sudoeste (Barry y Chorley, 1976; Palmen y Newton 1969; Price y Vaughan, 1992). Son unos de los sistemas más importantes que afectan al sur de Europa y norte de África, y los responsables de eventos catastróficos en cuanto a precipitación se refiere (García et al., 2001; Porcu et al., 2003), causando en muchos casos desastres tanto ecológicos como económicos.

La nubosidad asociada al frente que se encuentra en el borde delantero de la DANA es normalmente lo suficientemente espesa y desarrollada como para producir precipitaciones. En algunos casos existe nubosidad asociada a frentes en el borde trasero de la DANA que puede dejar también precipitaciones. En lo referente a la nubosidad en el centro de la DANA ésta es muy variable en función de si la DANA se encuentra sobre tierra o sobre superficie marina. Cuando la DANA se encuentra sobre tierra, se forma una capa de nubes bajas en el centro del sistema, la convección no está muy facilitada y no se producirán precipitaciones. Si la DANA se encuentra sobre el océano, el aporte de humedad desde superficie facilita más la convección y las precipitaciones son más probables.

1.3.1 Tiempo asociado sobre superficie oceánica

Para analizar las características de una DANa y su comportamiento cuando ésta se encuentra y se desarrolla sobre una superficie oceánica es necesario describir el campo de precipitación, de temperatura y de viento.

Las precipitaciones se producen principalmente en los flancos delantero -donde se forma un frente asociado a la baja-, en el posterior -frente de menor desarrollo- y en el centro del sistema -donde tienen lugar fenómenos convectivos a nivel mesoescalar, que pueden llegar incluso a ser considerados sistemas convectivos a mesoescala (Hernández et al., 1998). Estas precipitaciones pueden ser de carácter moderado a fuerte, se pueden detectar fenómenos tormentosos y registrar precipitaciones de granizo, con posibles precipitaciones en forma de nieve durante la estación de invierno.

Las isotermas sólo se ven afectadas en su curvatura en las capas altas de la troposfera, sin señal en superficie, excepto en las fases finales del desarrollo, por lo cual en superficie puede no existir señal ciclónica mientras en niveles altos troposféricos se detecta una vaguada térmica. En cuanto a los efectos meteorológicos se puede producir formación de hielo por las bajas temperaturas que se alcanzan en el centro de la baja.

Debido a los procesos convectivos y a la alta actividad que tiene lugar en torno a las células embebidas en los frentes, así como en el centro de la DANa, se producen rachas fuertes de viento.

En la figura 1.13 puede verse un esquema de los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en las distintas partes de estas DANAs.

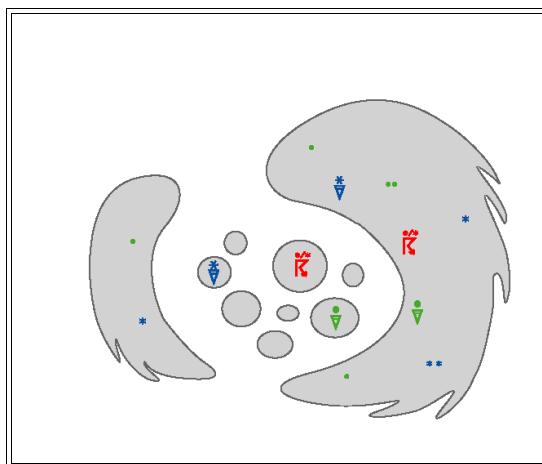


Figura 1.13: Esquema del tiempo asociado a una DANa cuando ésta se encuentra sobre superficie oceánica mediante símbolos SINOP.

En la imagen I.8 del anexo I puede verse una imagen del satélite Meteosat del canal IR donde se representan mediante símbolos de colores el tiempo asociado a una DANA cuando ésta se forma sobre superficie oceánica.

1.3.2 Tiempo asociado sobre tierra

Cuando una DANA pasa por encima de continentes se desarrolla una capa nubosa en su centro, siendo ésta la principal diferencia con una DANA que se encuentre sobre superficie oceánica. A semejanza de las que se desarrollan sobre océano, se producen fenómenos convectivos en los frentes asociados que, junto con la propia nubosidad frontal, dejan precipitaciones en forma de chubascos, cuya intensidad puede ser moderada, llegando en muchos casos a sucesos extremos severos. También existe la posibilidad de que las precipitaciones se produzcan en forma de granizo y que se desarrollosen fenómenos tormentosos, que en invierno pueden ser en forma de nieve. Tampoco hay señal térmica en superficie, mientras que en las capas altas de la troposfera se distingue una vaguada térmica. Existe también riesgo moderado o intenso de formación de hielo, debido a las bajas temperaturas que se alcanzan en su interior. Igualmente se producen fuertes ráfagas de viento en torno a las células convectivas que se encuentran embebidas en las bandas nubosas asociadas al sistema. También se detectan fenómenos de turbulencia.

En la figura 1.14 puede verse un esquema de los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en las distintas partes de estas DANAs.

En la tabla 1.4 se hace una breve descripción de las características de cada parámetro asociado a las DANAs, indicando las diferencias, en el caso de haberlas, cuando las DANAs ocurren sobre océano o sobre tierra.

En la imagen I.9 del anexo I puede verse una imagen del satélite Meteosat del canal IR donde se representan mediante puntos de colores el tiempo asociado a una DANA cuando ésta se forma sobre superficie continental.

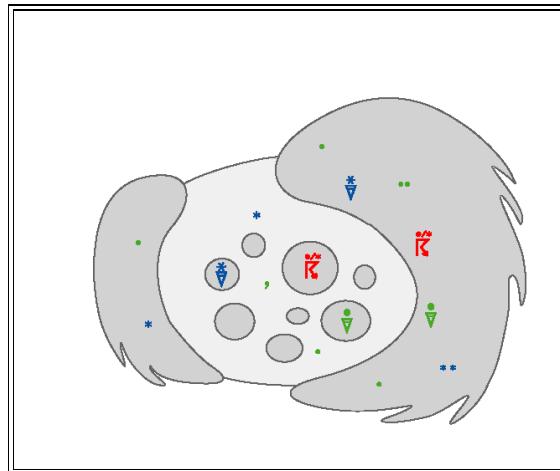


Figura 1.14: Esquema del tiempo asociado a una DANA cuando ésta se encuentra sobre superficie continental cálida mediante símbolos SINOP.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> Chubascos entre moderados y fuertes Precipitación estratiforme en la parte delantera de la DANA (escudo baroclinico) con Cb embebidos Posibilidad de precipitaciones de granizo y fenómenos tormentosos 	
	Sobre océano	Sobre tierra
	<ul style="list-style-type: none"> Precipitaciones de nieve en invierno Se distinguen células convectivas que producen precipitaciones en el centro de la DANA 	<ul style="list-style-type: none"> Posibles precipitaciones de nieve en invierno En la capa nubosa del centro: lluvias, lloviznas o nieve
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> No se observa señal ciclónica en superficie Vaguada térmica en niveles altos 	
Viento	<ul style="list-style-type: none"> Ráfagas fuertes de viento en torno a las células convectivas embebidas en las bandas nubosas asociadas. 	
Otros parámetros relevantes	<ul style="list-style-type: none"> Riesgo moderado a intenso de formación de hielo y turbulencias. Sobre océano: A veces se producen chubascos en los Cbs embebidos en la parte central de la DANA. 	

Tabla 1.4: Resumen de parámetros meteorológicos (precipitación, temperatura y viento) asociados a las DANAs, marcando las diferencias cuando éstas se encuentran sobre continente o sobre océano.

1.4 CORTE VERTICAL TÍPICO DE UNA DANAS

Para caracterizar el perfil vertical de una DANAs, conviene analizar diferentes campos y magnitudes, entre ellos cabe destacar el estudio de los campos de altura geopotencial, de la temperatura potencial equivalente, de la vorticidad relativa y potencial, de la advección de temperatura o de los valores de los píxeles de las imágenes de satélite de los canales IR y WV.

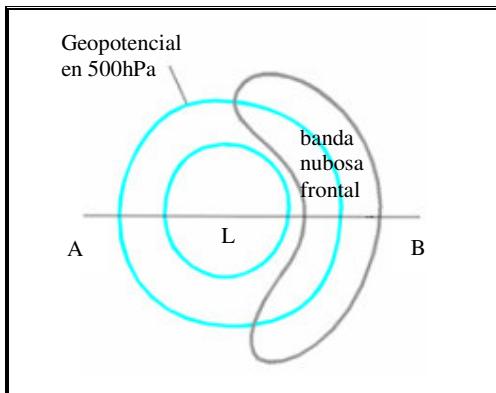
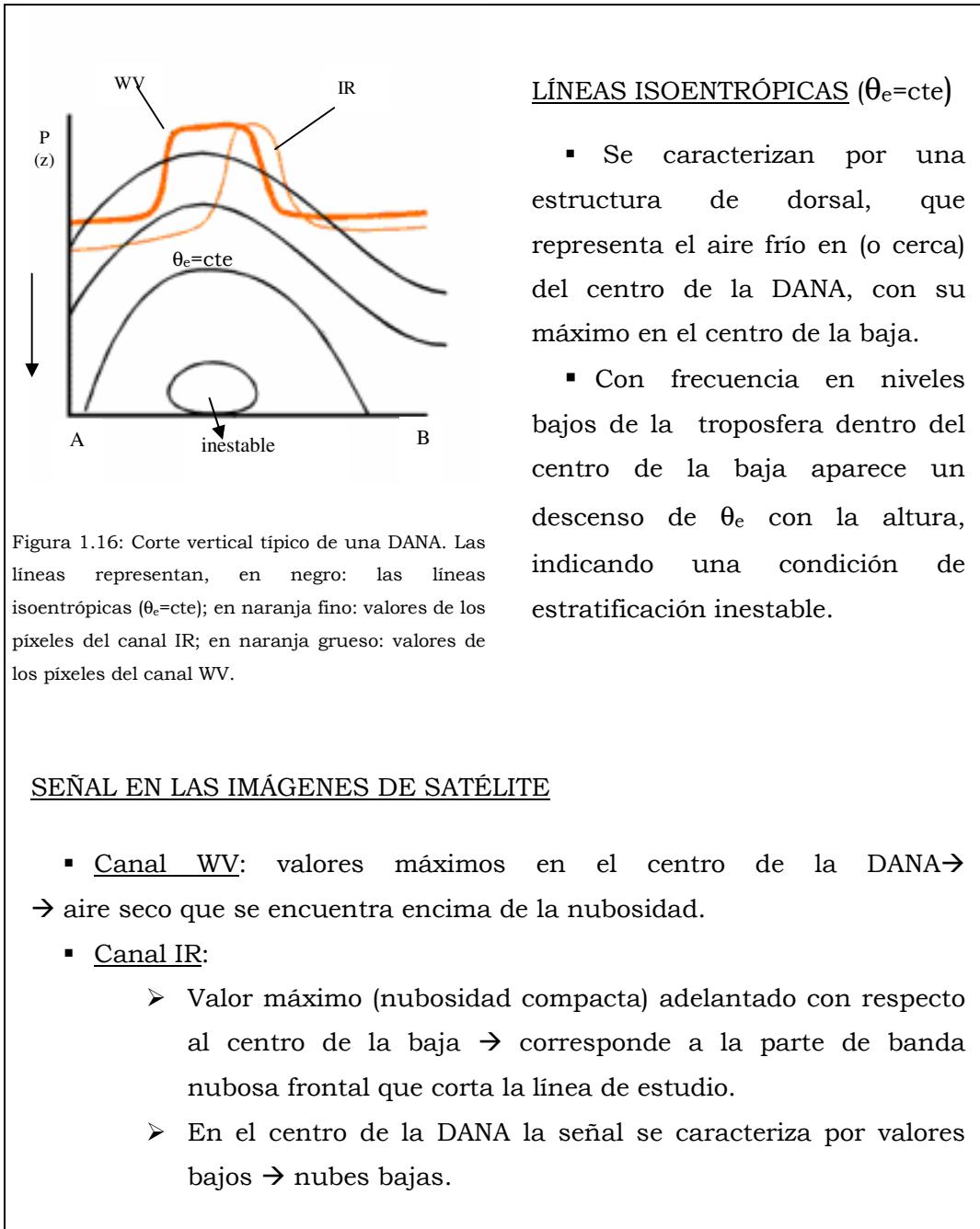
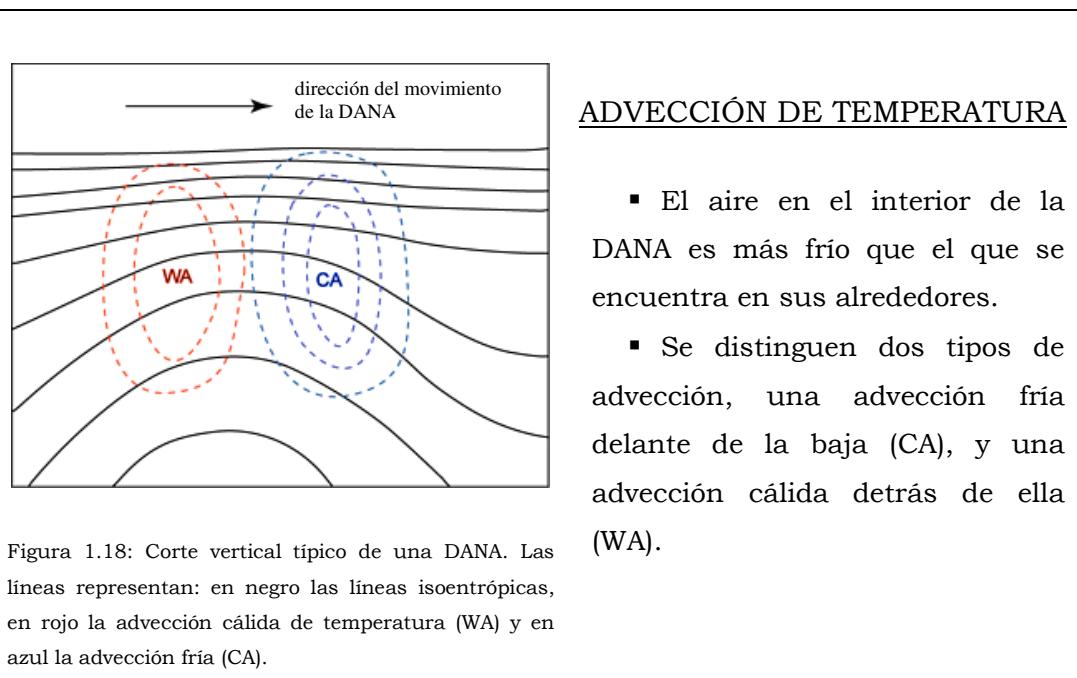
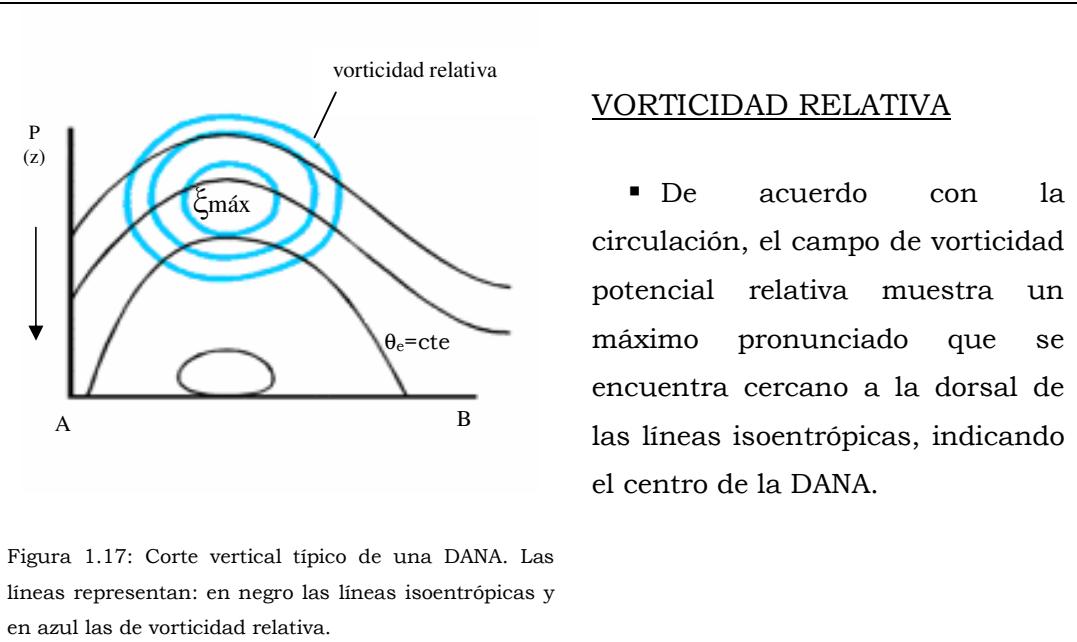


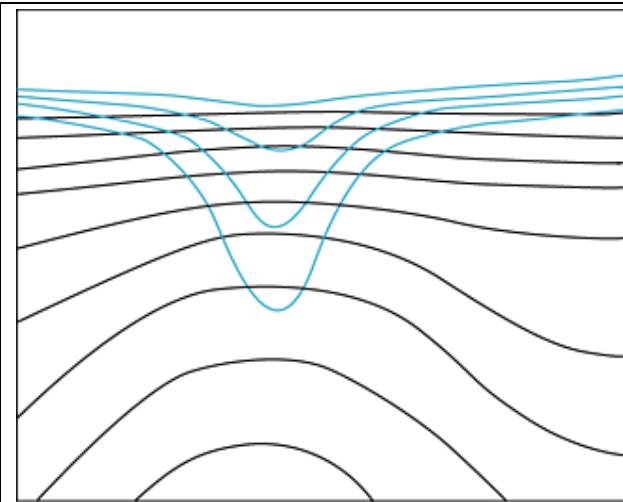
Figura 1.15: Esquema de una DANAs ideal.

El corte vertical que vamos a analizar es el que define el segmento A-B de la figura 1.15, que representa la estructura esquematizada de una DANAs. Este corte vertical incluye tanto el centro de la baja (L) como el centro de la banda nubosa frontal delantera (escudo barocílico).

En las figuras 1.16, 1.17, 1.18 y 1.19 se representan algunos de estos campos característicos de las DANAs. Aparecen representados el corte vertical del campo de líneas isoentrópicas ($\theta_e = \text{cte}$) y los valores típicos de los píxeles en imágenes de IR y WV -figura 1.16-, la vorticidad relativa -figura 1.17-, la advección de temperatura -figura 1.18- y la vorticidad potencial -figura 1.19-.







VORTICIDAD POTENCIAL

- El campo de vorticidad potencial presenta un máximo encima del centro de la DANA.
- A niveles bajos la vorticidad potencial es mayor dentro de la DANA que fuera de ella.

Figura 1.19: Corte vertical típico de una DANA. Las líneas representan: en negro las líneas isoentrópicas y en azul la vorticidad potencial.

Capítulo 2:

Objetivos

2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es la validación del modelo conceptual de depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) mediante la extensión del estudio a periodos de escala climática (41 años) y a todo el hemisferio Norte extratropical. La identificación de estos sistemas se hará utilizando técnicas de análisis objetivo, basadas en la imposición de los principales parámetros físicos del modelo conceptual de DANAs a datos del reanálisis NCAR-NCEP -*National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction*-. Para ello se elegirán los parámetros definitorios basados en los campos básicos de diagnóstico del modelo conceptual que sean más representativos y que definan mejor el sistema. Estos campos son:

- Mínimo de altura geopotencial en niveles altos de la troposfera.
- Circulación cerrada en niveles altos de la troposfera.
- Mínimo relativo de espesor equivalente.
- Mínimo de parámetro frontal térmico (PFT).

Este objetivo general se articula en torno a dos objetivos específicos:

1.- Elaboración de una climatología de DANAs en el hemisferio Norte en regiones extratropicales para un periodo válido en términos climatológicos -41 años, desde 1958 hasta 1998, ambos incluidos-. Se realizarán estudios sobre:

- a) Distribución espacial, localizando aquellas regiones de mayor densidad y analizando posteriormente estas áreas de manera individualizada.
- b) Distribución temporal -comprobación de la estacionalidad y la tendencia en la ocurrencia de DANAs-.
- c) Estudio de la duración y análisis de las trayectorias.

2.- Análisis de los fenómenos meteorológicos asociados a las DANAs para el dominio espacial de la Península Ibérica -determinación de los patrones de precipitación y nubosidad que producen estos

sistemas sinópticos cuando afectan a la Península Ibérica, en función de un amplio rango de parámetros como: origen, época del año o latitud-. Este análisis se realizará desde dos puntos de vista:

- a) analizando precipitación y nubosidad en función de la posición que ocupan las DANAs y
- b) en función de las regiones preferentes de precipitación de la Península.

Capítulo 3:

Datos

3 DATOS

Para la detección de las DANAS se han utilizado datos de reanálisis NCAR/NCEP, ya que cubren la extensión espacial necesaria para este estudio así como el período necesario para la realización de una climatología mediante una red de datos global. Las características de dicho reanálisis se describen en Kalnay et al. (1996) y Kistler et al. (2001) y los archivos pueden encontrarse en <http://wesley.wwb.noaa.gov/reanalysis.html>. El reanálisis NCAR-NCEP facilita datos cada seis horas para el período 1958-1998 –ambos incluidos-, distribuidos en una red de resolución horizontal 2.5° de latitud por 2.5° de longitud para distintos niveles, resolución apropiada para el análisis de sistemas de tiempo a escala sinóptica. En este trabajo se han utilizado la altura geopotencial, la velocidad zonal, la temperatura y la vorticidad potencial, en el dominio 20°N - 70°N y con periodicidad diaria (usando datos de las 00 UTC).

Para analizar los patrones de precipitación que producen las DANAs cuando afectan a la Península Ibérica utilizamos los datos de la red principal y secundaria de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología español.

En la tabla 2.1 se resumen los datos utilizados, el período disponible y la fuente de procedencia.

DATOS	PERÍODO DE REGISTRO	FUENTE
Reanálisis (Altura geopotencial, velocidad zonal, temperatura y vorticidad potencial)	1958-1998	Reanálisis NCAR/NCEP (Kalnay et al., 1996)
Red principal y secundaria del INM	1958-2003	Instituto Nacional de Meteorología (INM)

Tabla 3.1: Resumen de los datos utilizados, período del que se dispone y fuente de procedencia.

3.1 El Reanálisis NCAR/NCEP

NCAR y NCEP han colaborado para crear un reanálisis de larga duración (más de 50 años), utilizando un sistema de asimilación de datos globales y una base de datos lo más completa posible. Los cambios en los sistemas de observación pueden, a pesar de todo, introducir cambios perceptibles en el clima analizado, pero este problema se minimiza produciendo análisis paralelos -de al menos un año de duración- con y sin utilizar el nuevo sistema para el periodo inmediatamente posterior a su introducción.

El modelo tiene 5 niveles en la capa límite y unos 7 niveles por encima de 100 hPa. El nivel más bajo del modelo se encuentra a unos 5 hPa de la superficie y el más elevado a unos 3 hPa. Esta estructura vertical se escogió de forma que la capa límite quedara bien resuelta y que el análisis estratosférico a 10 hPa no se viese muy afectado por las condiciones límite superiores. El modelo incluye parametrizaciones de la mayor parte de los procesos físicos más importantes, como son la convección, precipitación a gran escala, convección superficial, rastreo de las ondas de gravedad, radiación (incluyendo el ciclo diurno de radiación e interacción con la nubosidad), física de capa límite o procesos de difusión vertical y horizontal.

Los datos asimilados en el modelo proceden de diferentes observaciones: datos de radiosondeos a escala global para la temperatura, viento horizontal y humedad específica; datos de superficie oceánica, procedentes de observaciones desde barcos, boyas fijas o a la deriva, o de estaciones meteorológicas a nivel del mar como son la presión superficial, temperatura, viento horizontal y humedad específica; datos sinópticos de superficie; de las observaciones de temperatura y viento realizadas desde aviones; datos procedentes de las sondas de los satélites, como son, por ejemplo, los de sondeos verticales de temperatura sobre el océano de la sonda de observación infrarroja operativa del satélite de órbita polar TIROS-NOAA o sobre tierra por encima de 1000 hPa de su sonda vertical operativa TOVS, o la medida de vientos a partir de la deriva de las nubes procedentes de satélites geoestacionarios como el GOES o el Meteosat.

Las variables interpoladas en una red se clasifican en cuatro clases (Kalnay et al., 1996): variables de tipo A, aquellas fuertemente influídas por

las observaciones disponibles y son, por tanto, los productos más fiables del reanálisis, por ejemplo temperatura en altura, viento zonal y meridional, temperatura virtual o altura geopotencial; variables de tipo B, aquellas que aunque están directamente influidas por las observaciones también están fuertemente influidas por el modelo, por lo que resultan menos fiables, incluyen variables como la humedad, viento divergente o parámetros superficiales; variables de tipo C, como flujos en superficie, razones de calentamiento y precipitación o nubosidad, que están completamente determinadas por el modelo -sujetas a la restricción de la asimilación de otras observaciones-; y por último las variables de tipo D, que son aquellos campos que se obtienen de datos climatológicos y que no dependen del modelo, como puede ser el albedo. Aunque esta clasificación es necesaria en determinados casos se vuelve un tanto subjetiva, por ejemplo: la componente zonal del viento (variable del tipo A), es primordialmente no divergente excepto en los trópicos donde la influencia del modelo es mayor y la convierte en una variable tipo B.

3.2 Datos de Estaciones de la Red Principal y Secundaria del INM

Para el estudio de los fenómenos meteorológicos asociados con las DANAs se utilizan datos de las estaciones meteorológicas de la red principal y algunas estaciones de la red secundaria del INM.

Los datos utilizados para la precipitación son datos tomados de la red principal de las estaciones del INM y algunas de la red secundaria. Son series de precipitación acumulada medida entre las 07 y 07 UTC.

Las series de datos de precipitación acumulada que se utilizarán en este trabajo corresponden a 69 observatorios distribuidos a lo largo de la geografía de la Península Ibérica, Islas Baleares y Melilla. Estas series constituyen una muestra representativa de la orografía y la diversidad geográfica que presenta el territorio a estudiar. En la figura 3.1 se muestra la situación geográfica de los observatorios (a la derecha las posiciones de las estaciones utilizadas para el análisis de la nubosidad y a la izquierda las de precipitación). Una descripción más detallada de las series aparece en las tablas II.1 y II.2 del

anexo II en las que se recogen el código, las coordenadas gráficas, la altura del observatorio, el periodo de registro y en número de datos y de lagunas en las series de datos de cada estación.

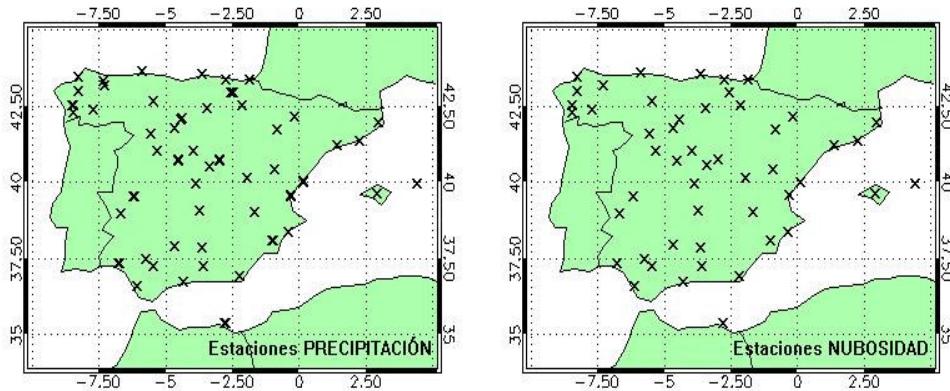


Figura 3.1 Situación geográfica de los observatorios de la red de principal y secundaria del INM.

La serie de datos diarios de nubosidad corresponden a 50 observatorios de la red principal del INM. En la figura 3.1 se muestra su situación geográfica. En la tabla II.3 del anexo II se hace una descripción más detallada en la que aparece el código, las coordenadas geográficas y la altura de cada observatorio.

Capítulo 4:
Métodos de
Identificación de
DANAs

4 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DANAS

4.1 REVISIÓN DE MÉTODOS PREVIOS

Existen estudios previos sobre climatologías de DANAs en el hemisferio Norte, que han sido realizados en regiones de dimensión menos extensa que la hemisférica, o en el caso de hemisférica para periodos cortos de tiempo, para los cuales se han utilizado diversos métodos y algoritmos.

Parte de los trabajos se basan en análisis objetivos, es el caso de las climatologías realizadas a finales de los 90 por Parker et al. (1989) y Bell y Bosart (1989), quienes identificaron depresiones aisladas en niveles altos evaluando el campo de altura geopotencial en el nivel de 500 hPa para toda una rejilla de datos en el hemisferio Norte y determinando si cada uno de ellos cumplía la condición de mínimo de geopotencial, para así caracterizar el centro de las DANAs. Consideraron que un punto de rejilla es un mínimo si éste tiene un valor de geopotencial menor que los ocho puntos que lo rodean y este punto representa una DANA si hay una diferencia de 30 m en todas las direcciones. Más adelante Novak et al. (2002) y Smith et al. (2002) han aplicado esencialmente el mismo algoritmo de identificación, imponiendo, además de las condiciones antes citadas, algunas más restrictivas y utilizando datos de reanálisis NCAR/NCEP. El objetivo de ambos estudios fue analizar exhaustivamente la ocurrencia de DANAs sobre los Estados Unidos; y en el caso de Novak, además, se centró exclusivamente en la estación cálida (1 mayo – 30 septiembre). Otro parámetro de diagnóstico utilizado es el basado en el hecho de que las DANAs se caractericen por una anomalía en la altura de la tropopausa, produciéndose valores altos de vorticidad potencial en su interior. Esta característica fue usada por Hernández (1999) y Cuevas y Rodríguez (2002) para la identificación de DANAs sobre el Atlántico Norte durante el periodo comprendido entre enero de 1989 y enero de 1999. El criterio para la detección de las DANAs es el mismo en los dos estudios: la búsqueda de contornos cerrados de, por lo menos, 2 unidades de vorticidad potencial (UVP; $1 \text{ UVP} = 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{Kkg}^{-1}$) y un máximo encerrado en dicho contorno de, al menos, 4 UVP en cualquiera de las superficies isoentrópicas analizadas (315 K, 320 K, 325 K y 330 K). En el trabajo de Cuevas y Rodríguez

(2002) a los contornos cerrados localizados mediante esta técnica se les impuso también la condición de que el contorno cerrado de 2 UVP tuviese una extensión mínima de 30° x 30°.

Cuando la identificación de las DANAs se ha hecho mediante análisis subjetivo se han buscado contornos cerrados de geopotencial o circulaciones cerradas en el campo de vientos. Éste es el método utilizado por Price y Vaughan (1992) para analizar un año (1.10.82-30.9.83) y para el periodo comprendido entre 1985-1989, así como Kentarchos y Davies (1998) para 1990-1994, quienes estudiaron visualmente mapas diarios de presión en el nivel de 200 hPa del hemisferio Norte. Este mismo método ha sido utilizado por Qi L. et al. (1999) para identificar DANAs en el sur de Australia (25°S/40°S –110°E/150°E) para el periodo comprendido entre 1983 y 1996.

En la tabla 4.1 se hace un resumen de los estudios previos a este trabajo, apuntando tanto las referencias como tipo de método utilizado, método de identificación, la región de estudio y el periodo para el cual se detectan las DANAs.

4.2 PARÁMETROS DE DIAGNÓSTICO

Para identificar las DANAs en este trabajo se utiliza un sistema de tres pasos consecutivos, basados en las características físicas del modelo conceptual de DANA descritas en el capítulo 1. Este método impone condiciones cada vez más restrictivas, quedando en cada caso aquellas DANAs que cumplen los umbrales impuestos. Así, de las características físicas que definen una DANA utilizaremos en nuestro estudio las siguientes: mínimo de geopotencial, circulación cerrada en el campo de vientos, condiciones de espesor equivalente y de parámetro frontal térmico. Las condiciones se fueron aplicando siguiendo un orden restrictivo (en la figura 4.1 se resumen los pasos seguidos). Se comenzó buscando aquellos puntos que cumpliesen la condición de mínimo de geopotencial en la troposfera superior, concretamente en el nivel

FUENTE	MÉTODO	PERÍODO	REGIÓN	IDENTIFICACIÓN
Parker et al. (1989)	Objetivo	1950-1985	Mitad oeste del hemisferio Norte	Mínimos de geopotencial en 500 hPa
Bell y Bosart (1989)	Objetivo	1963-1985	Hemisferio Norte	Mínimos de geopotencial en 500 hPa
Price y Vaughan (1992)	Subjetivo	1 año: 1.10.82- 30.9.83 1985-1989	Hemisferio Norte (0°N-70°N)	Mapas de geopotencial en el nivel de 200 hPa
Kentarchos y Davies (1998)	Subjetivo	1990-1994	Hemisferio Norte (0°N-70°N)	Mapas de geopotencial en el nivel de 200 hPa
Hernández (1999)	Objetivo	1989 - Enero 1999	Atlántico Norte	Contornos cerrados de vorticidad potencial
Qi L. et al. (1999)	Subjetivo	1983-1996	Sur Australia (25/40°S- 110/150°E)	Mapas de geopotencial en los niveles de 200 y 500 hPa
Smith et al. (2002)	Objetivo	1953-1999	Hemisferio Norte y NE USA.	Mínimos de geopotencial en 500 hPa
Novak et al. (2002)	Objetivo	1 Mayo- 30 Septiembre. 1953-1999	Hemisferio Norte y NE USA	Mínimos de geopotencial en 500 hPa
Cuevas y Rodríguez (2002)	Objetivo	1989- Enero 1999	Atlántico Norte (60°W/80°N- 30°E/20°N)	Contornos cerrados de vorticidad potencial

Tabla 4.1: Resumen de los distintos estudios sobre detección y climatologías de DANAs.

de 200 hPa, logrando así la eliminación de puntos de rejilla no pertenecientes a una DANA. Para considerar que un punto pertenezca o represente el centro de una DANA, debe tener un valor de geopotencial menor que al menos seis de los ocho puntos que lo rodean, de manera que sólo puedan ser superiores en valor los correspondientes, bien al punto de rejilla inmediatamente superior al que estamos analizando, bien al que se encuentra al noroeste. De esta forma se tiene también en consideración la primera fase del desarrollo de la DANA, en la cual las líneas de geopotencial no se encuentran cerradas por el límite superior, y las fases finales, en las cuales la baja es embebida por el flujo zonal por su límite más septentrional. Cumpliendo este requisito se considera

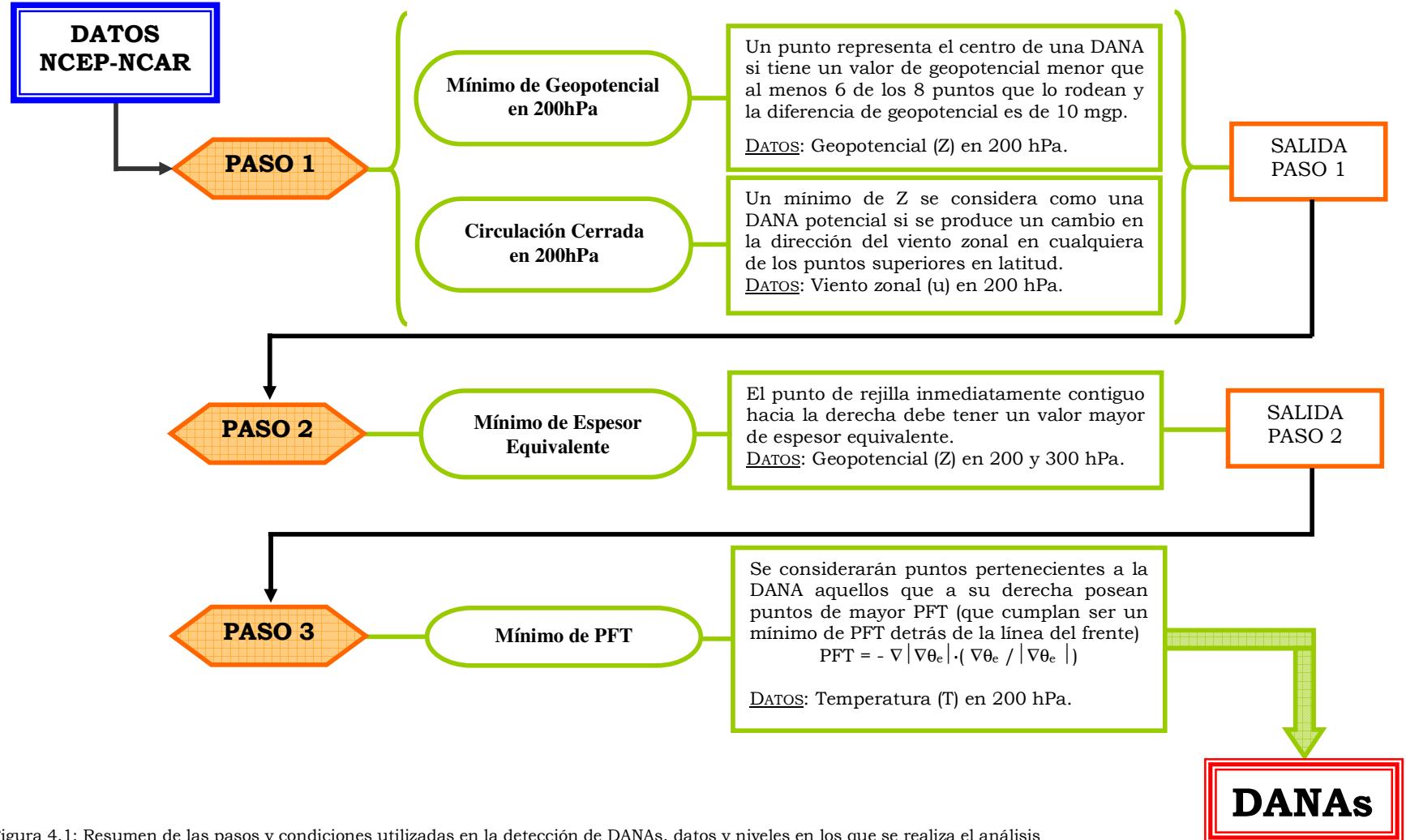


Figura 4.1: Resumen de las pasos y condiciones utilizadas en la detección de DANAs, datos y niveles en los que se realiza el análisis

un punto de rejilla como punto de ocurrencia de DANA si además hay una diferencia de 10 mgp en las seis direcciones. Este valor se decidió por comparación con el número de DANAs para la región de la Península Ibérica calculado por Price y Vaughan (1992) mediante un método subjetivo, entre octubre del 1982 a marzo del 1983.

Una vez localizados los puntos que cumplen esta primera condición se aplica la segunda restricción. Consiste en cerciorarse de que se trata de una circulación cerrada y aislada de la circulación general, para lo cual utilizamos el campo de vientos en 200 hPa, en concreto la coordenada horizontal (u). Se considera que un punto de rejilla pertenece a una DANA si en los puntos superiores en latitud se produce un cambio en la dirección en el vector de viento zonal.

Con estas dos condiciones nos aseguramos tener una estructura ciclónica cerrada con un mínimo de geopotencial como centro y aislada de la circulación general. Como se comentó al principio de este capítulo la detección de las DANAS se realiza en pasos consecutivos y cada vez más restrictivos, a la suma de estas dos propiedades le denominaremos “**paso 1**”.

El “**paso 2**” será la aplicación de una tercera condición a aquellos puntos que ya han sido seleccionados mediante el “paso 1”. En esta tercera restricción se identificarán los puntos de rejilla que cumplan con la condición de “espesor equivalente”, esto es, que el campo se caracterice por un fuerte gradiente de espesores en la parte delantera de la baja, y con un mínimo pronunciado detrás o en su centro. El espesor equivalente se define como el espesor de la capa atmosférica que se encuentra entre dos superficies de geopotencial. Para seguir considerando un punto como perteneciente a una DANA debe ser un mínimo de espesor equivalente, por lo que al menos el punto de rejilla inmediatamente contiguo hacia la derecha debe tener un valor mayor de espesor equivalente. Para el cálculo de espesores se han utilizado datos de geopotencial en los niveles de 200 y 300 hPa.

El “**paso 3**” será la imposición de la condición de parámetro frontal térmico (PFT). Se define el PFT del siguiente modo:

$$PFT = - \nabla |\nabla \theta_e| \cdot (\nabla \theta_e / |\nabla \theta_e|)$$

siendo θ_e la temperatura potencial equivalente del punto de rejilla al nivel de estudio, que en nuestro caso fue de 200 hPa.

La condición es muy similar a la del paso anterior, se considerarán puntos pertenecientes a la DANA aquellos que a su derecha posean puntos de mayor PFT, es decir, que cumplan ser un mínimo de PFT detrás de la línea del frente, donde los valores alcanzan su máximo. Así de este modo localizaremos los puntos centrales de la depresión.

En las figuras 4.2 y 4.3 se ilustra el procedimiento seguido paso a paso para un caso real de DANA. El método utilizado identifica una DANA que comienza el 09-agosto-1991 y termina el 11-agosto-1991 (figura 4.2). Estos son los tres días en los cuales todas las condiciones impuestas se cumplen. En la figura 4.3 están representados el día previo (08-agosto) y el día posterior (12-agosto), en los cuales no se detectaron los puntos como DANA debido a que alguna de las condiciones no se cumplían. Aunque la condición de mínimo de geopotencial sí se satisface en ambos días, en el caso del día 08 de agosto no se cumplen las otras tres condiciones restantes, mientras que el 12 de agosto dejan de cumplirse al llegar a la relativa al PFT.

Imponiendo estas tres condiciones a los datos iniciales de reanálisis creamos una base de datos que nos servirá para proseguir en este trabajo.

Para cualquiera de los pasos anteriores consideramos además las siguientes reglas para definir las DANAs:

- a) Se considera que varios puntos pertenecen a una misma DANA cuando éstos se encuentran en puntos adyacentes.
- b) Para considerar que una DANA es la misma en días consecutivos se ha de cumplir que al día siguiente los puntos que cumplen las condiciones de DANA sean los mismos del día anterior o que sean puntos contiguos.
- c) Se considera que dos sistemas de DANAs son independientes cuando no se encuentran puntos adyacentes que cumplan la condición analizada.

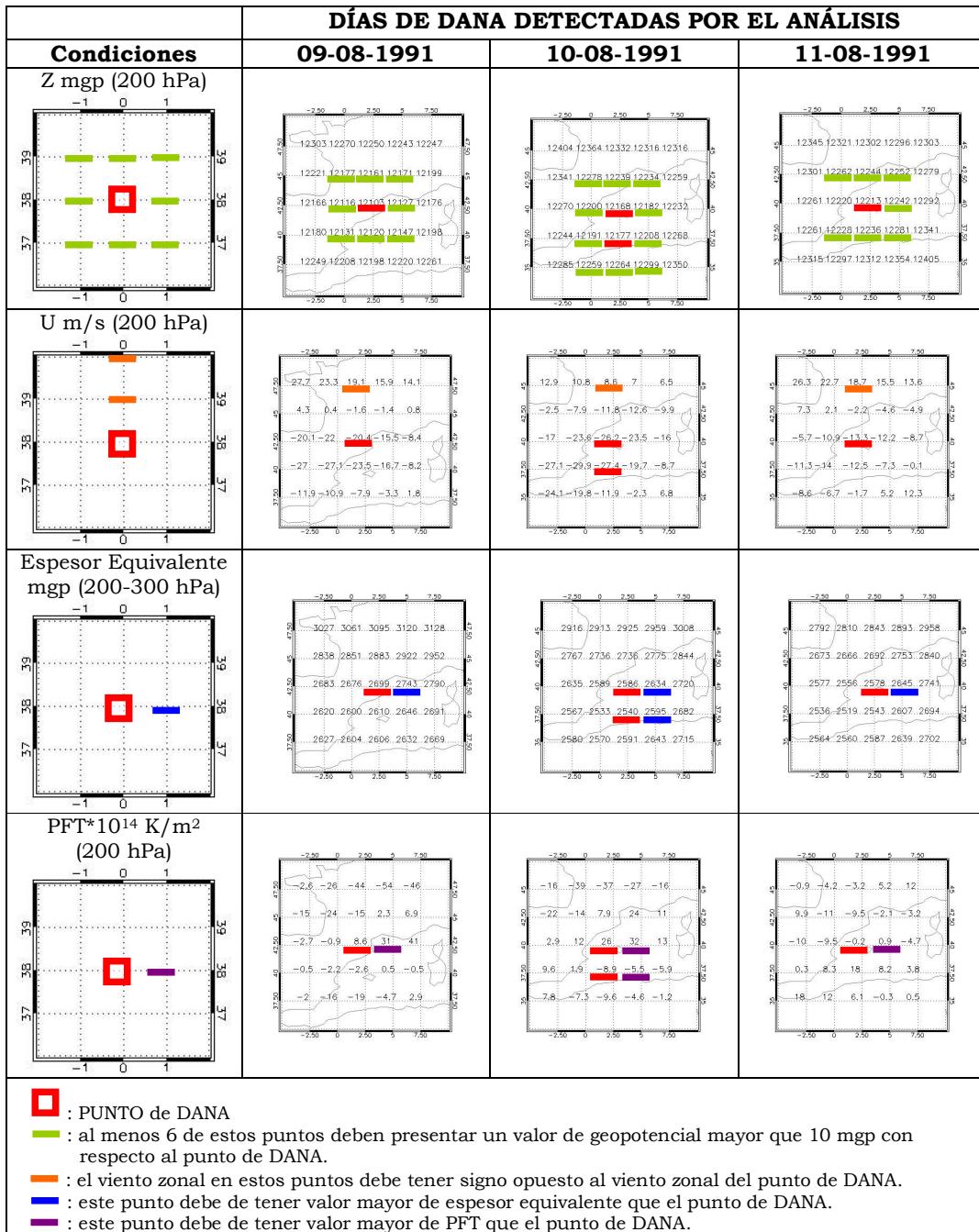


Figura 4.2: Ejemplo paso a paso del método automático utilizado para el caso real de una DANA detectada por el análisis objetivo aplicado (09-11 agosto 1991).

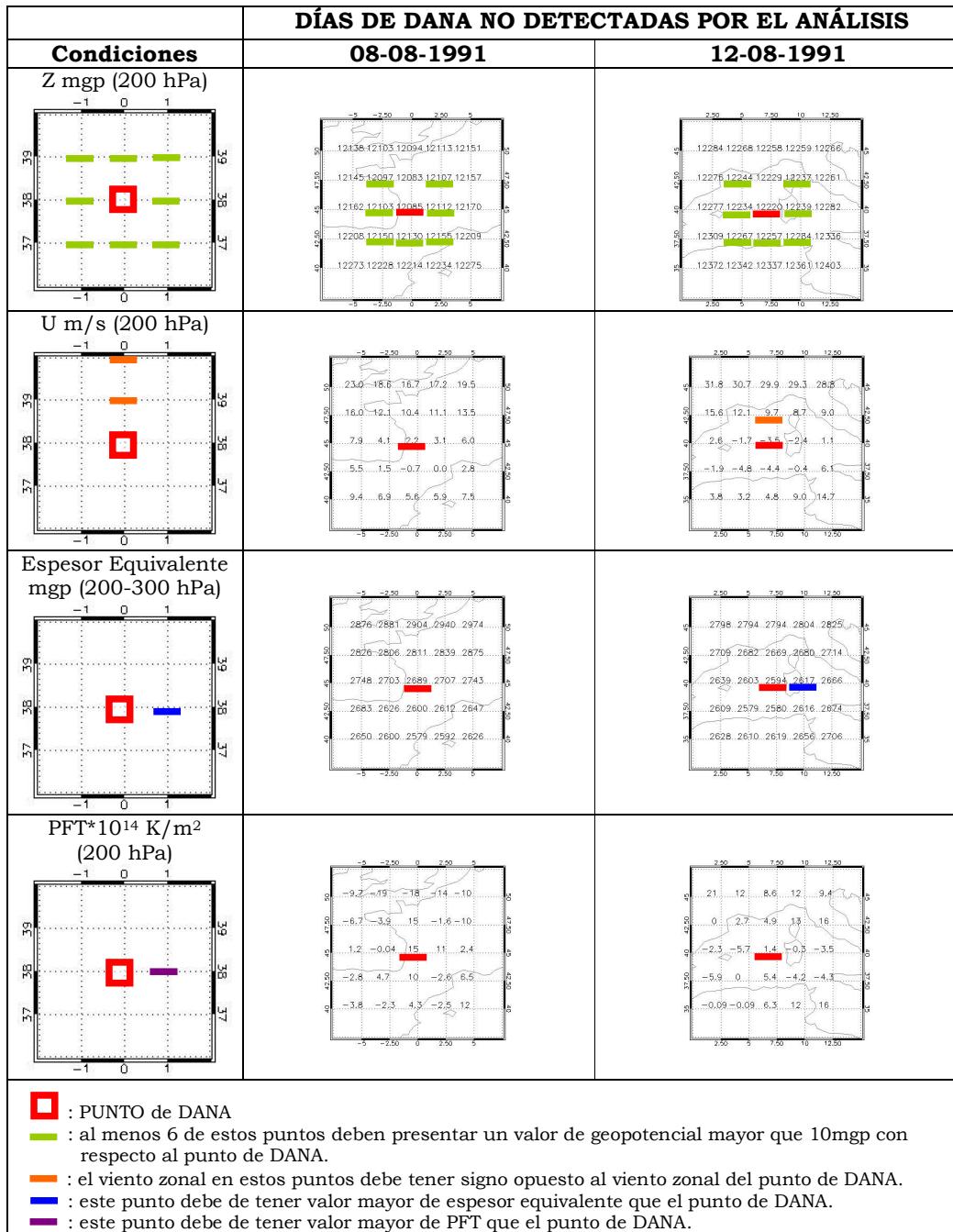


Figura 4.3: Igual que en la figura 4.2 pero para el día anterior al primero de ser detectada la DAN (08 agosto 1991) y el día posterior al último día detectado (12 agosto 1991) por el método automático. Estos dos días no cumplen alguna de las condiciones impuestas.

- d) Cuando varios puntos contiguos cumplen la misma condición el mismo día, consideramos como punto representativo de la DANA aquel que se encuentra en la posición más al noroeste. Esta será la posición que se analizará posteriormente en los análisis espaciales de distribución de DANAs. Esta elección del punto representativo de la DANA permite identificar el punto donde la circulación se encuentra cortada más cercano a la circulación general.

Se excluyen aquellos sistemas cuya duración es tan sólo de un día, siguiendo el mismo criterio de Price y Vaughan (1992) y Kentarchos y Davies (1998).

Este método, aun siendo objetivo, no está completamente ausente de ambigüedad. El problema de no considerar algún sistema como DANA al final de nuestro análisis (después del “paso 3”) está minimizado por la imposición de las tres condiciones restrictivas consecutivas. Aun así, existe una pequeña probabilidad de ignorar sistemas que sí pueden ser localizados utilizando métodos subjetivos (Price y Vaughan (1992) o Kentarchos y Davies (1998), - que denotaremos a partir de ahora como PV y KD respectivamente-). PV en su estudio subjetivo estiman que en torno a un 10% de los sistemas de depresiones aisladas en el nivel de 500 hPa no son considerados por tratarse de casos que se encuentran en la frontera de las condiciones que ellos imponen. Es razonable pensar que en nuestro caso, tratándose de un análisis objetivo, y considerando que extendemos el estudio a varias décadas, se obviará un porcentaje ligeramente mayor. Se puede hacer una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los de PV y KD, pero no puede ser muy rigurosa debido a la diferencia de los datos utilizados y a la clara diferencia en la longitud del periodo analizado. Elegiremos para ello el periodo que comprende desde abril de 1983 hasta septiembre de ese mismo año para la comparación con PV y el verano (julio-agosto-septiembre) de 1990 y 1991 para la comparación con KD.

La figura 4.4 muestra la distribución de DANAs entre abril de 1983 y septiembre de 1983, periodo analizado por PV.

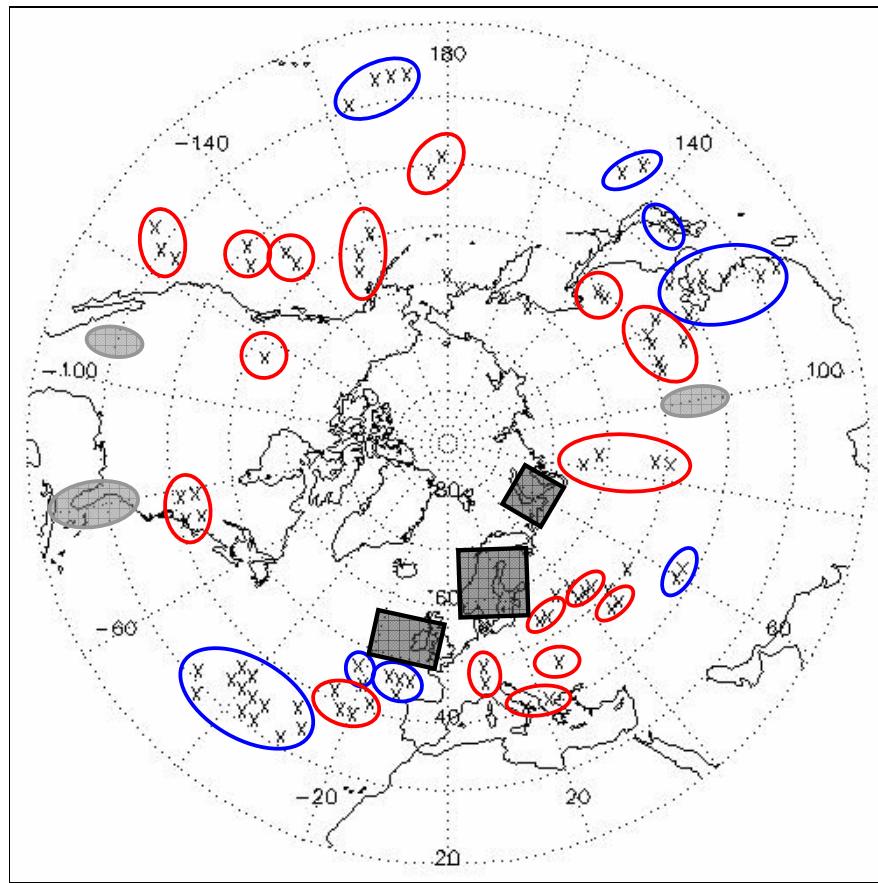


Figura 4.4: Distribución de DANAs entre abril 1983 y septiembre 1983, periodo analizado por Price y Vaughan (PV). Las cruces marcan una DANA identificada mediante nuestro método (“paso 3”). Los círculos rojos representan sistemas identificados también por PV (figura 5 en Price y Vaughan, 1992), los círculos en azul son aquellos sistemas que PV no identifican, los círculos con el área gris marcan DANAs identificadas por PV pero no por nuestro análisis en el “paso 3” pero si en los pasos anteriores y los rectángulos sombreados en negro señalan DANAs identificadas por PV y que no han sido detectadas en ninguno de nuestros pasos.

Cada cruz representa a una DANA, identificada mediante nuestro método objetivo, tras aplicarle todas las restricciones definidas, es decir, tras el “paso 3”. Los círculos en rojo marcan aquellos sistemas coincidentes con lo identificado en el estudio de PV (figura 5 en Price y Vaughan (1992)), los círculos azules marcan aquellos sistemas que no son identificados por PV , los círculos con el área en color gris indican aquellas zonas donde existen

sistemas identificados por PV pero no identificadas por nuestro método para el “paso 3” pero que sí lo han sido en pasos anteriores, y por último las regiones marcadas mediante un rectángulo sombreado en negro son aquellas en las cuales en ninguno de nuestros pasos se han identificado DANAS y sí existen en el análisis de PV.

En términos generales podemos ver que existen coincidencias en ambos métodos para las regiones extratropicales, una sobreestimación de DANAs por parte de PV en regiones polares (por encima de 60°N) y una sobreestimación en nuestro método para áreas subtropicales o incluso en las tropicales. Un análisis más exhaustivo de esta comparativa nos lleva a notar que en nuestro método no se detectan DANAs en las regiones del norte de Europa y la parte sur de Norteamérica, mientras que la parte central del océano Pacífico y del Atlántico son las áreas donde el método de PV no es efectivo. En cualquier caso, estas regiones no son las principales áreas de ocurrencia de DANAs (sur de Europa, la costa pacífica de Norteamérica y la costa pacífica de Asia; (PV (1992) y KD(1998)), para las cuales el acuerdo entre ambos métodos es satisfactorio.

Esta misma comparativa se ha realizado con los resultados de Kentarchos y Davies (1998). Se ha elegido la estación de verano -definida con los meses de julio, agosto y septiembre- del año 1990 (figura 4.5a) y de 1991 (figura 4.5b), que son los dos períodos analizados por Kentarchos y Davies con mayor número de DANAs. En este caso las conclusiones son semejantes a las de la comparativa con PV, se puede concluir que existe una buena coincidencia en latitudes extratropicales y especialmente en las tres regiones más importantes de ocurrencia de DANAs.

Otro modo de asegurar que el método automático de identificación reconoce casos reales de DANAs y no simplemente ciclones en el nivel de 200 hPa es analizar si realmente los sistemas encontrados se encuentran aislados de la circulación general de los oestes. El estudio se centra en el sector definido entre 25°N a 47.5°N y desde 50°W hasta 40°E, región que abarca el oeste Atlántico, el continente europeo y la región mediterránea (más adelante se denominará “sector Europeo”).

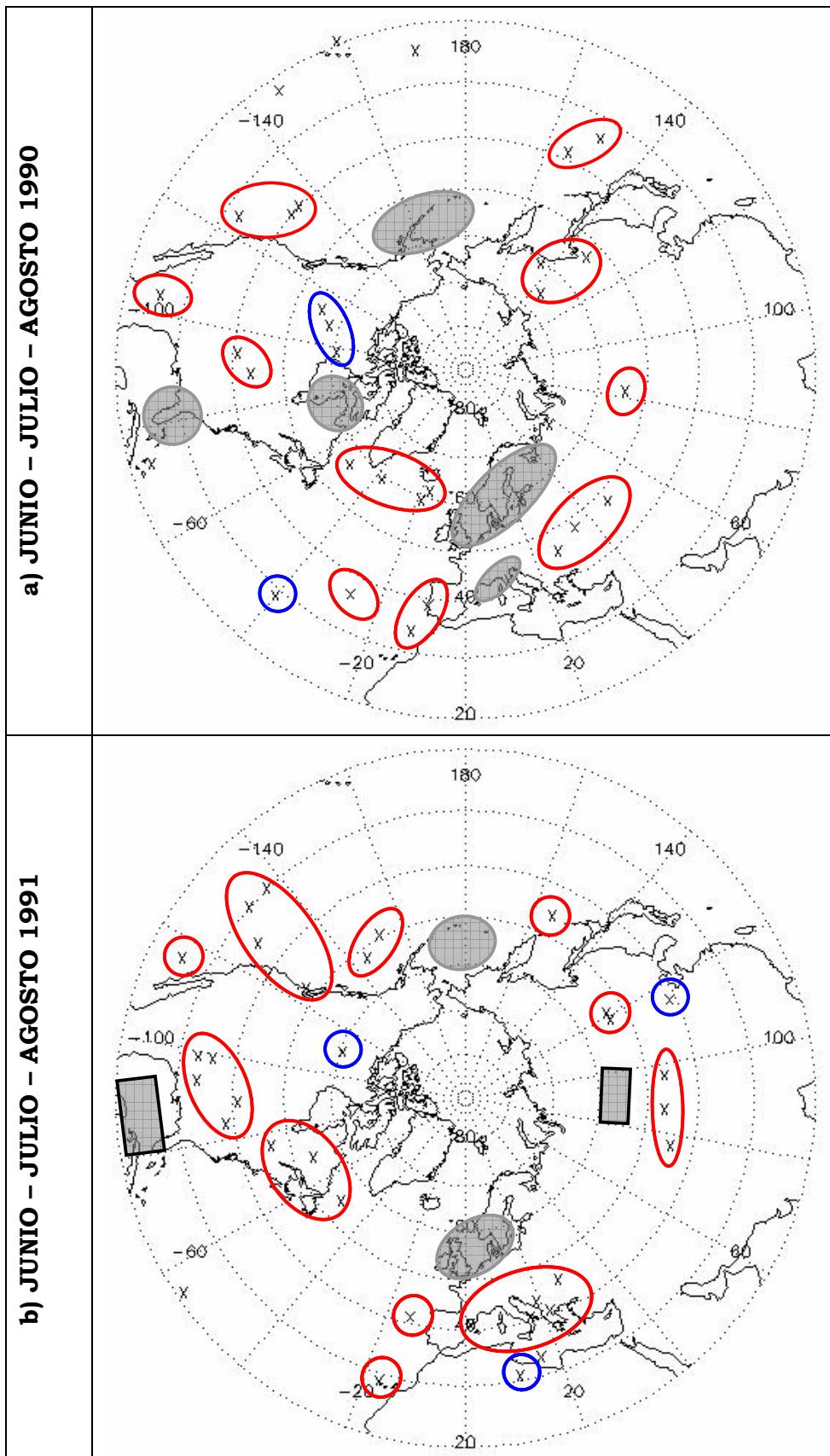


Figura 4.5 a y b: Como la figura 4.4 pero para el verano de 1990 (a) y 1991 (b) –periodo analizado por Kentarchos y Davies (KD) con el mayor número de DANAs (figuras 5c y 5g en KD (1998)-.

Para ello se compara el comportamiento de la circulación zonal en dos regiones (figura 4.6):

- ✓ en torno al punto de DANA, zona representativa de la circulación de la DANA, que denominaremos "A", y
- ✓ el área inmediatamente superior, "B", representativa de la circulación general del oeste.

La relación entre ambos comportamientos en el caso de una DANA real debería ser muy diferente del comportamiento climatológico.

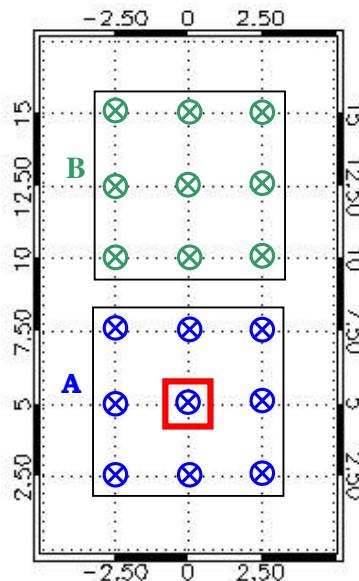


Figura 4.6: Esquema para el cálculo de "A" y "B" utilizado para comprobar que las DANAs están aisladas de la circulación general. Recuadro azul: puntos utilizados para calcular la media del viento zonal en los alrededores del punto representativo de la DANA (cuadro rojo). Recuadro verde: puntos para el cálculo de la media del viento zonal para los puntos inmediatamente superiores al punto de DANA.

"A" es el valor medio del viento zonal para el punto de DANA y sus 8 puntos adyacentes (recuadro azul en la figura 4.6) y "B" es la media de los 9 puntos que se encuentran inmediatamente más al norte (recuadro verde en la figura 4.6). Denominamos " A_m " y " B_m " a las medias climatológicas para el día concreto de calendario del día que ocurre la DANA para todo el periodo

analizado -41 años-. Dado que los vientos del oeste dominan la circulación extratropical, “ A_m ” y “ B_m ” deberían tener el mismo signo, por lo tanto, $B_m/A_m > 0$. Pero en el caso de una DANa, los vientos del este afectan al valor de “A”, cambiándole de signo o, por lo menos, disminuyendo fuertemente su valor, mientras que en “B” no se sentiría ninguna influencia. Así, en este caso, se tendrá que $B/A < 0$ o $B/A > B_m/A_m$.

Ambos cocientes, B/A y B_m/A_m , se calcularon para cada día de las DANAs y su relación se muestra en la figura 4.7. Se calcularon también las medias de ambos cocientes, siendo para $B/A = -4.41$, de valor negativo como cabía esperar dado que le afectan los vientos del este del punto de la DANa en el término “A”, y para $B_m/A_m = 1.50$, de signo positivo, ya que se trata de las medias climáticas. Se realizó un test ‘t-student’, mostrando que ambas series de B/A y

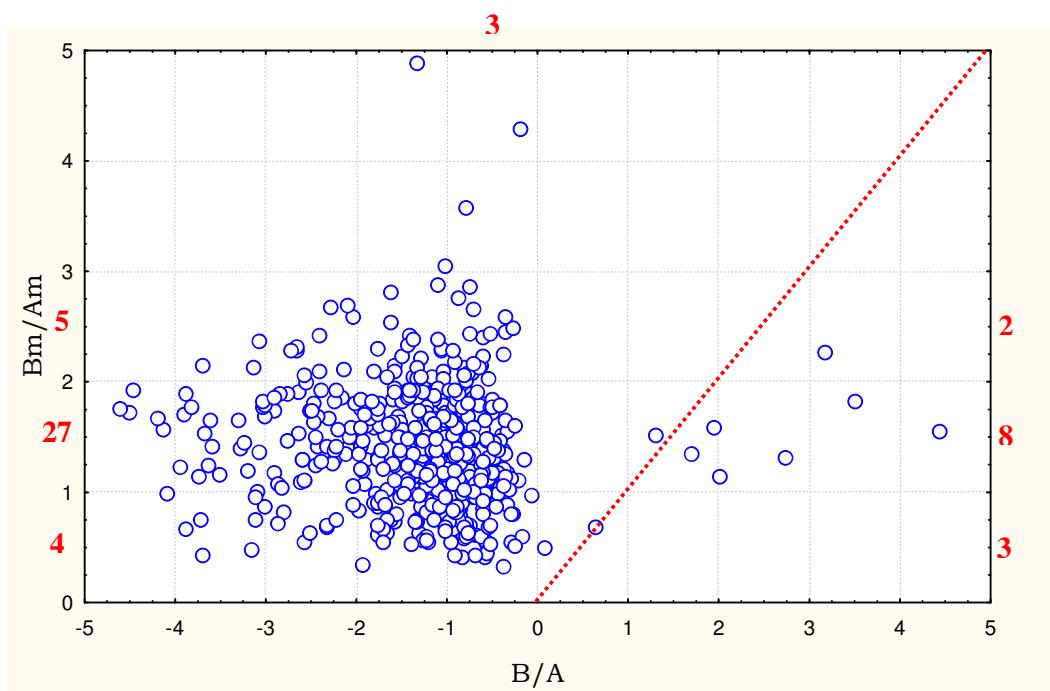


Figura 4.7: Diagrama de distribución que muestra la relación entre B/A y B_m/A_m (B_m y A_m son los valores climatológicos diarios de las medias de B y A) durante el periodo 1958-1998 para todas las DANAs. Los números en rojo son casos fuera de los límites del diagrama. La línea roja indica los mismos valores de B/A y B_m/A_m .

B_m/A_m son significativamente diferentes ($p=0.02$) para el total de los 601 casos de DANAs analizadas. Como se esperaba, B_m/A_m es siempre positivo ya que la región que analiza corresponde a latitudes con vientos del oeste. Sin embargo B/A es en su mayoría negativo, debido al habitual valor negativo de “A”.

Para los casos en los que el valor de B/A es negativo es evidente que el sistema se encuentra aislado de la circulación general atmosférica. Existen muy pocos casos –23 de 601- en los que B/A es positivo (se tiene que cumplir que el signo del viento zonal en el recuadro azul y verde de la figura 4.6 sea el mismo). Estos casos corresponden en su mayoría a valores positivos tanto del término “B” como del “A”.

En los casos en que B/A y B_m/A_m tengan valores similares la DANA puede no estar aislada de la circulación general. En la figura 4.7 se marca con una línea roja punteada estos valores similares. Los puntos cercanos a la línea serían los posibles casos de DANAs no aisladas, y son tan sólo, como mucho, 9 casos de 601, que representan menos del 1.5% de los casos.

En el resto de los 13 casos (números en rojo fuera de la gráfica 4.7 a la derecha) con valores positivos de B/A el cociente es suficientemente grande como para pensar que estos sistemas están realmente aislados de la circulación del oeste, dado que el valor elevado de B/A se debe a un valor muy pequeño de “A” con respecto a “B”.

Otras dos características de las DANAs, pero que no han sido utilizadas como parámetros de diagnóstico en este método objetivo, son el campo de geopotencial en 1000 hPa y el campo de vorticidad potencial. A continuación se hace un pequeño análisis de estos dos campos para confirmar que el método objetivo utilizado detecta realmente sistemas de DANAs.

Las DANAs no siempre tienen señal en el campo de geopotencial en superficie. Puede aparecer una baja débil en este nivel durante las últimas fases de formación de la DANA. Para las DANAs localizadas en este estudio se comprueba que para el sector Europeo, donde se han identificado 601 casos, tan sólo 283 forman una baja en el nivel de geopotencial de 1000 hPa durante los días que ocurre el sistema o durante el día posterior, lo que representa un 47.1% del total.

El campo de vorticidad potencial (VP) en una DANA se caracteriza por la presencia de altos valores de VP en su centro, aunque un máximo local de vorticidad potencial no garantiza que se trate de una DANA, ya que existen otras estructuras con esta misma característica. Este método fue utilizado por Hernández (1999) y Cuevas y Rodríguez (2002) en la región Atlántica como se describió anteriormente. En este estudio de verificación del método automático de extracción de DANAs sí resulta útil el análisis de este campo. Para ello, se comprueba si las DANAs identificadas corresponden a valores elevados de vorticidad potencial. El criterio para hacerlo es similar al de Hernández, Cuevas y Rodríguez, localizar contornos de al menos 2 unidades de vorticidad potencial (UVP: 1 UVP= $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{Kkg}^{-1}$) y un máximo encerrado en dicho contorno de, al menos, 4 UVP en la superficie isoentrópicas de 330 K, eligiendo como contorno los ocho puntos que rodean al punto localizado como DANA. El resultado encontrado muestra que el 72.63% de las DANAs identificadas por el método objetivo aplicado en el sector Europeo se corresponden con un máximo de vorticidad potencial.

En la figura 4.8 se muestra los valores de vorticidad potencial para una DANA real localizada entre el 09 de agosto y el 11 de agosto de 1991 (mismo caso que en las figuras 4.2); y en la figura 4.9 los valores de vorticidad potencial para el día anterior al primero de ser localizada la DANA -08 de agosto- y el siguiente al último -12 de agosto-. Se puede ver que, de acuerdo con el método de la vorticidad potencial, el caso de DANA elegida como ejemplo sigue siéndolo, pero con la diferencia de que comenzaría un día antes y terminaría también un día antes.

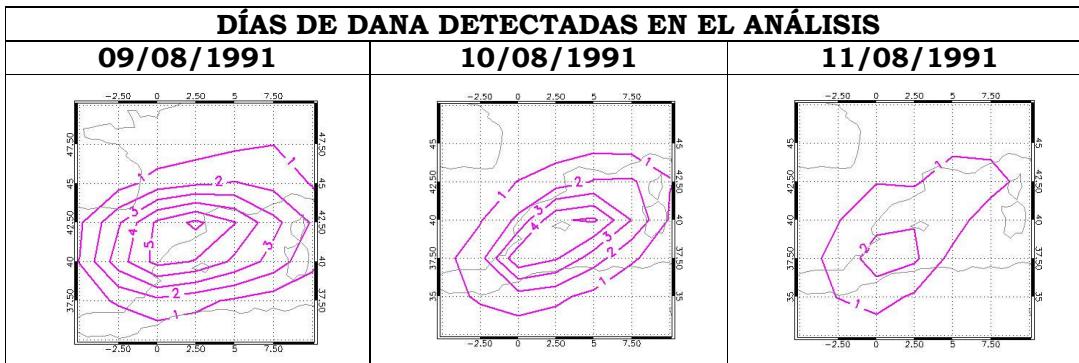


Figura 4.8: Vorticidad potencial (expresada en UVP en el nivel isoentrópico de 330 K) para el mismo caso de la DANA analizada en las figuras 4.2 y 4.3.

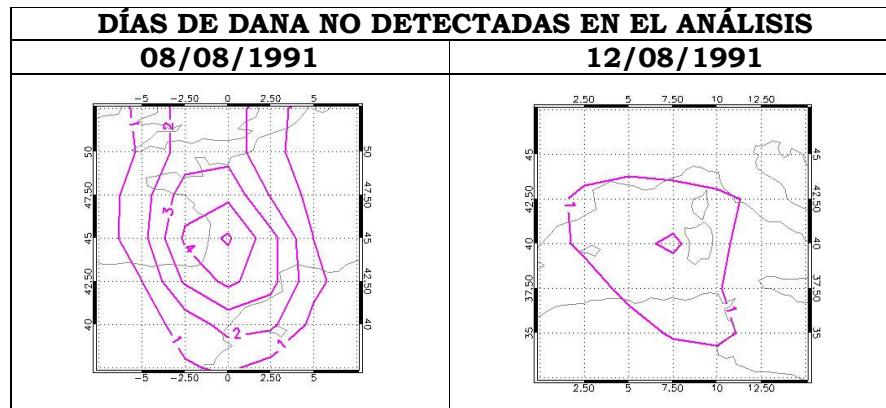


Figura 4.9: Vorticidad potencial (expresada en UVP en el nivel isoentrópico de 330 K) para el mismo caso de la DANAs analizada en las figuras 4.2 y 4.3.

El alto porcentaje de DANAs identificadas que presentan un máximo de vorticidad potencial confirma la fiabilidad del método aplicado en este trabajo para la detección de depresiones aisladas en niveles altos.

En definitiva, las condiciones utilizadas en la detección objetiva de las DANAs, cuando se aplican todas juntas, garantiza que los sistemas identificados sean realmente DANAs, puesto que no existe ningún otro sistema que cumpla todas las condiciones analizadas simultáneamente.

Capítulo 5:
Climatología de DANÁs
en el Hemisferio Norte

5 CLIMATOLOGÍA DE DANAs EN EL HEMISFERIO NORTE

Como se mencionó en el capítulo 2, uno de nuestros objetivos es la elaboración de una climatología de depresiones aisladas en niveles altos para un periodo válido en términos climatológicos, analizando su distribución tanto espacial como temporal, sus duraciones y trayectorias. Se articulará, pues, este capítulo en tres partes: en la primera se tratará del estudio de la distribución espacial, localizando aquellas regiones de mayor densidad y analizando posteriormente estas áreas de manera individualizada; la segunda parte se basará en el análisis de la distribución temporal, es decir, la comprobación de la estacionalidad y la tendencia en la ocurrencia de DANAs; y, por último, se tratará tanto la duración de estos sistemas como el análisis de las trayectorias más favorables.

Existen, como se ha dicho en el capítulo anterior, estudios anteriores a este trabajo en los cuales se hace un análisis de DANAs pero en ningún caso se pueden considerar estudios climatológicos debido a que analizan periodos de tiempo cortos, como son los casos de Price y Vaughan (PV, 1992) -desde octubre 1982 a septiembre 1983- y Kentarchos y Davies (KD, 1998) -para el periodo comprendido entre 1990-1994-, o para regiones de menor extensión que la hemisférica –como los trabajos de Smith et al. (2002), Novak et al. (2002) o Cuevas y Rodríguez (2002)-. Aunque los periodos de estudio de PV y KD sean menores, sí cubren la misma extensión geográfica de nuestro análisis, es decir, el hemisferio Norte, y por lo tanto se puede contar con estudios estadísticos previos con los cuales comparar nuestros resultados.

5.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE DANAS EN EL HEMISFERIO NORTE

5.1.1 Antecedentes

Kentarchos y Davies (1998) dentro del periodo de 5 años para el cual realizaron un estudio estadístico, analizaron dos de ellos con mayor profundidad, 1990 y 1991. Para estos dos años comprobaron que la distribución espacial de ocurrencia de DANAs varía según la estación del año, así, para el invierno de 1991 localizaron cuatro regiones de mayor ocurrencia: oeste y centro Europa, norte de China y Siberia, norte del océano Pacífico y noroeste de Canadá; para la primavera de ese mismo año advirtieron que la concentración de DANAs era mayor y a su vez cambiaba la distribución geográfica, siendo el continente europeo la región más favorecida para su desarrollo, pero ocurriendo más DANAs en regiones secundarias, como son el norte de Rusia, el norte del océano Pacífico (cerca de Alaska), el norte y este de China y el oeste y sur de los Estados Unidos. Observaron además que no tan sólo cambia la distribución de modo estacional dentro del mismo año, sino que también varía de año a año. Comparando la primavera del 1990 con la primavera del 1991, encontraron que había una concentración mayor de DANAs para este último año sobre la región de Europa continental y un descenso en la región del Pacífico-Alaska.

Aunque existen variaciones entre los diferentes años en la distribución geográfica en el hemisferio Norte, hay algunas áreas comunes que presentan mayor frecuencia de formación de DANAs. Extendiendo el periodo de estudio a 5 años (1990-1994), KD encontraron que las regiones más favorecidas para su desarrollo son: la región noreste de Estados Unidos, el este de Canadá, el norte del Pacífico (especialmente entre Japón y Alaska), Europa Continental, el norte de China y Siberia y la zona este y noreste del océano Atlántico. Tras realizar este estudio de manera hemisférica dividieron el hemisferio en cuatro sectores, denominándolos del siguiente modo: ‘Europa’ (40°W - 50°E), ‘Siberia’ (50°E - 140°E), ‘Pacífico Norte’ (140°E - 130°W) y ‘América’ (130°W - 40°W). Analizando estos sectores longitudinales para el periodo 1990-1994 observaron que para cada año el sector ‘Europa’ es el que más fenómenos de DANAs presenta, con una media del 33.2% sobre el total de casos registrados para los cinco años. Para ‘Siberia’ el valor es del 18%, para ‘América’ del

27.3% y finalmente para el ‘Pacífico Norte’ es del 21.5%. Como puede comprobarse existe una fuerte variabilidad entre los diferentes sectores, pero también muestran una gran variabilidad interanual entre ellos. Encontraron que, por ejemplo, en el año 1990 la concentración de DANAs entre ‘Europa’ y el ‘Pacífico Norte’ es similar –con una diferencia de tan sólo 5 casos- sin embargo en el año 1992 las diferencias son mucho más pronunciadas –diferencia de más de 10 eventos-.

Otro resultado interesante al cual llegaron fue que dentro del mismo sector europeo existen dos regiones preferentes en la formación de DANAs: la zona este del Atlántico (la cual acumula el 51% del total de casos sobre ‘Europa’) y la parte sur del continente y la región del Mediterráneo (representando el 26%). Llasat y Puigcerver (1990) encontraron distribuciones similares cuando examinaron la distribución geográfica de ‘cold pools’ sobre Europa en un nivel de 500 hPa. Esto también corresponde con los resultados de Appenzeller et al. (1996a, b) al examinar la evolución de intrusiones estratosféricas de flujos de valores elevados de vorticidad potencial (VP). Cabe recordar que la fragmentación del flujo de VP está habitualmente ligado a la formación de DANAs.

Otro de los estudios citados al principio de este apartado es el realizado por Price y Vaughan (1992) para el periodo de un año -01.10.82/30.09.83-. En el estudio hemisférico realizado dividieron el análisis en dos periodos de tiempo, el primero desde octubre a marzo y el segundo desde abril a septiembre. Para el primer subperiodo localizaron algunas regiones de mayor concentración de DANAs como son el norte de Europa, el norte de China, el norte del Pacífico, España, Turquía, el Mar Caspio, el norte del Atlántico y el este de Estados Unidos. Para el segundo periodo cambia la distribución geográfica, así como la frecuencia de ocurrencia, hay mayor número de casos de DANAs sobre el oeste de Europa, el norte de Rusia, a ambos lados de Norteamérica, sobre la parte este del océano Pacífico, sobre el mar Adriático y Siberia.

El estudio climatológico realizado por Smith et al. (2002) identifica y analiza los casos de DANAs ocurridos en un periodo de tiempo mayor que los anteriores y muy semejante al que se va a analizar en este trabajo. Esta

climatología comprende un periodo de 47 años, desde 1953 a 1999, en el nivel de 500 hPa para todo el hemisferio Norte, pero su análisis tan sólo abarca los meses de invierno -diciembre, enero y febrero (DEF)-, encontrando un máximo a lo largo del noroeste del océano Pacífico con un máximo de frecuencia sobre el mar de Okhotsk. Esta área más favorecida para el desarrollo de depresiones aisladas en niveles altos se extiende a lo largo del Pacífico Norte y las islas Aleutianas. También encontraron otras regiones de mayor frecuencia de ocurrencia como son el sudoeste de Estados Unidos, el extremo este de Canadá y una banda estrecha que se extiende desde el norte de África hasta Turquía. El resto de su análisis se centra en EE.UU. sin hacer ningún tipo de comparativa con el resto del hemisferio.

Otro trabajo que se ve limitado a un área más pequeña es el realizado por Cuevas y Rodríguez (2002), en el cual analizan las DANAs en la región comprendida entre 60°W-30°E y 80°N-20°N para un periodo de diez años -1989/1999- a partir de análisis diarios. En él se observa cómo las frecuencias más altas de aparición de DANAs se producen en una franja latitudinal entre 35°N y 40°N, preferiblemente en las cercanías de la Península Ibérica. En los meses de verano y otoño las frecuencias más altas se encuentran localizadas en la franja 40°N y 45°N, justo en el norte de la Península Ibérica, coincidiendo con la migración de la circulación atmosférica hacia el norte. En el mes de abril y mayo los valores más altos se localizan en la vertiente Atlántica, que junto con el mes de marzo, es cuando existe mayor probabilidad de que interactúen las DANAs con el *jet subtropical* (Cuevas y Rodríguez, 2001). Observaron que durante todo el año, excepto en los meses de verano, dos máximos absolutos de aparición de DANAs se sitúan al sudoeste y al sur de la Península Ibérica, en torno al estrecho de Gibraltar, resultado que concuerda con el de Hernández (1999). El máximo absoluto que encontraron al suroeste aparece como tal a lo largo de todos los meses del año, excepto en verano a diferencia de lo obtenido por Hernández (1999) y Bell y Bosart (1989).

De estos estudios se puede resumir que existen regiones más favorables en la ocurrencia de DANAs, siendo éstas las siguientes: Europa, la región que comprende China y Siberia, el norte del océano Pacífico, el noreste y la parte

más occidental de los Estados Unidos y el noreste del océano Atlántico, siendo Europa el área más favorecida, reuniendo aproximadamente un tercio del total de casos de DANAs.

También se encuentran diferencias importantes en la distribución espacial de las DANAs atendiendo al cambio estacional, de todos modos en las climatologías hemisféricas de PV y KD siguen existiendo regiones de mayor probabilidad de ocurrencia. Estas áreas son para el invierno la parte oeste y central de Europa, el área norte de China hacia Siberia, el norte del océano Pacífico y el noreste de Canadá, y durante las estaciones de primavera y verano serían el sudoeste europeo, el norte de África, el norte de Rusia, el norte del Pacífico (cerca de Alaska), el norte y este de China y la parte oeste y sur de los Estados Unidos.

5.1.2 Resultados

Para estudiar la distribución espacial de las depresiones aisladas en niveles altos en el hemisferio Norte, se representa para todo el periodo (1958-1998) los primeros días de ocurrencia de los sistemas para los tres pasos utilizados en el método de extracción de DANAs. La figura 5.1 muestra esta distribución, donde la escala de colores indica el número absoluto de casos de DANA, teniendo en cuenta, como se dijo en el capítulo anterior, que de cada DANA se considera como punto representativo aquel que se encuentra en la posición más al noroeste. También se representa la densidad de DANAs -figura III.1 del anexo-, es decir el número de sistemas por el área comprendida entre los puntos de rejilla ($\text{número de DANAs}/10^5 \text{ km}^2$), para así poder comparar la ocurrencia de DANAs en áreas de diferente tamaño, más pequeñas cuanto más septentrionales. Este modo de representación es distinto al utilizado por KD y PV, quienes muestran en sus estudios de distribuciones espaciales el número absoluto de días para los cuales existe una DANA. La conveniencia de utilizar tan sólo el primer día de ocurrencia se debe al hecho de que es más representativo en la identificación de áreas de mayor ocurrencia de DANAs, que es el objetivo de este capítulo.

El resultado más evidente es que la distribución general es muy similar en los tres pasos, ocurriendo una mayor concentración de las DANAs en tres regiones: a) el sur de Europa y la costa este del océano Atlántico, incluyendo el mar Mediterráneo, y el norte de África, región que denominaremos a partir

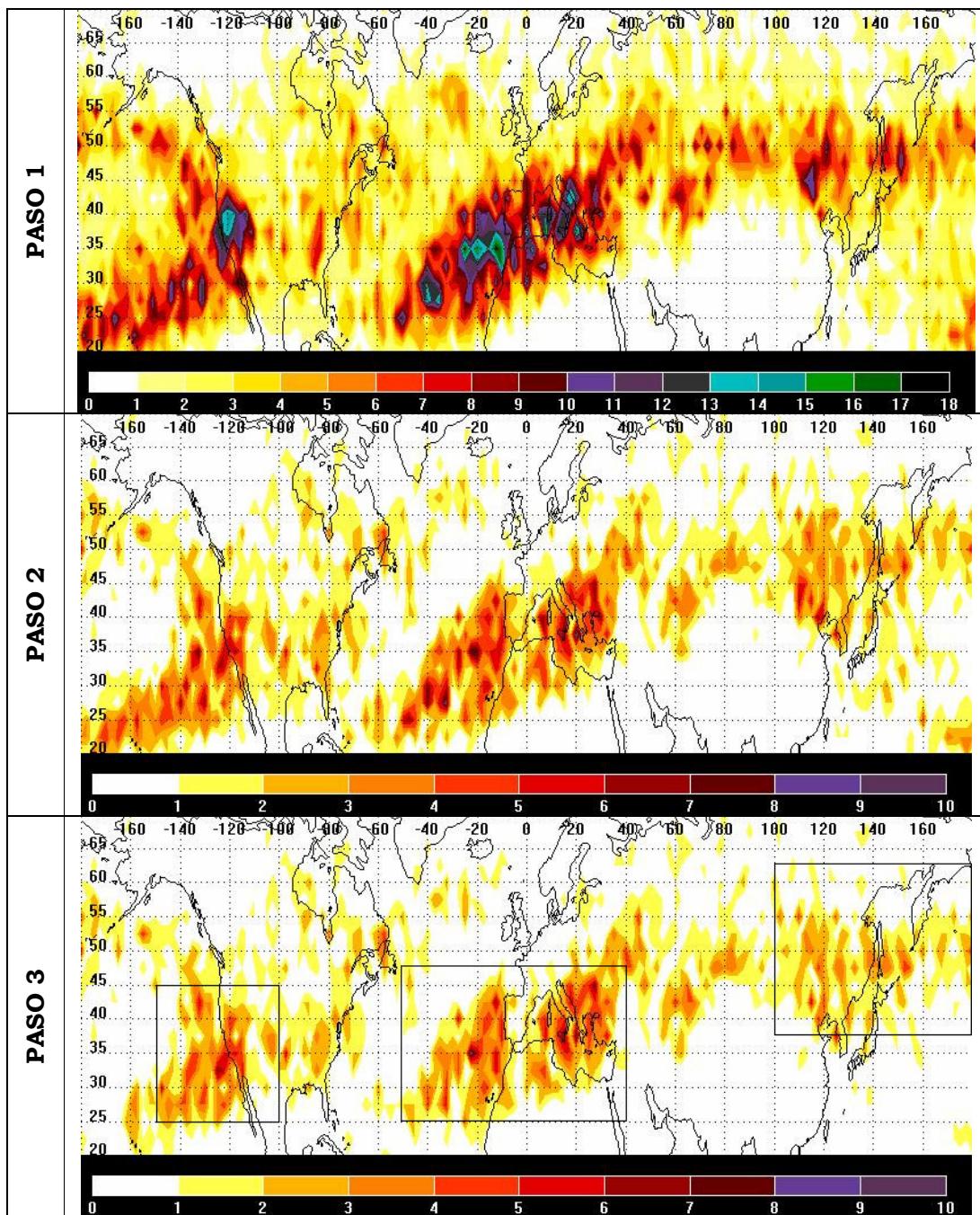


Figura 5.1: Número total de DANAs por punto de rejilla ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) para el periodo completo de estudio (1958-1998) y para los tres pasos utilizados en la identificación de las DANAs.

de ahora como “sector Europeo”, b) la costa noreste del océano Pacífico y el noreste de los Estados Unidos, que denominaremos “sector Americano” y c) la región del norte de China hasta Siberia extendiéndose hasta la costa noroeste del océano Pacífico, que denominaremos “sector Asiático”. Estas tres áreas de mayor ocurrencia se ven de modo más evidente en una versión suavizada de la distribución de DANAs en la que el número de éstas fue recalculado para un rejilla de 5° de latitud por 10° de longitud (figura 5.2).

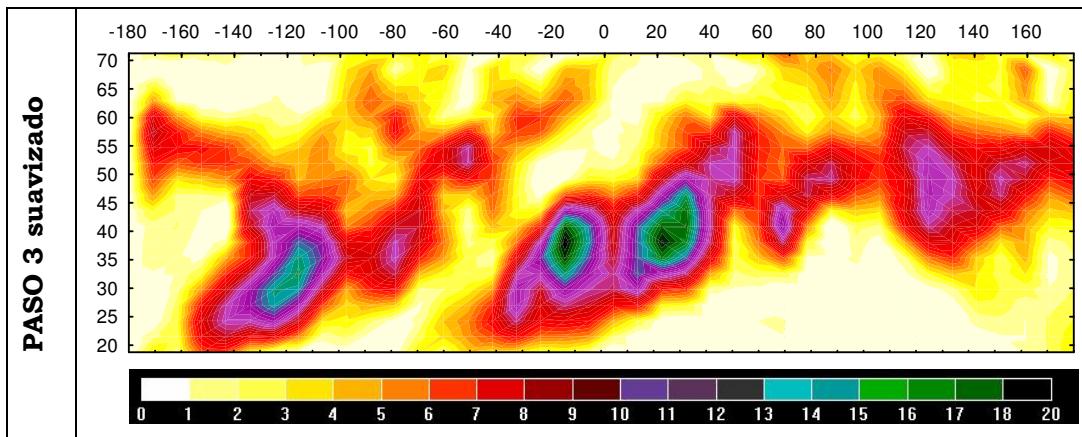


Figura 5.2: Versión suavizada del número total de DANAs para el periodo completo de estudio (1958-1998) para el PASO 3 calculada para una rejilla de 5° de latitud y 10° de longitud.

Estos tres sectores se pueden delimitar mediante las siguientes latitudes y longitudes: el sector Europeo se define como la región comprendida entre 25°N hasta 47.5°N y desde 50°W hasta 40°E , el sector Americano se extiende desde 25°N hasta 45°N y desde 100°W hasta 150°W y el sector Asiático desde 37.5°N hasta 62.5°N y desde 100°E hasta 180°E . Estas tres regiones pueden verse delimitadas en la figura 5.1 y III.1 para el paso 3. En general estos resultados concuerdan con las climatologías parciales previas de KD y PV, para quienes el área de mayor frecuencia de DANAs ocurre desde el norte de Europa hasta el noreste de Canadá.

El número total de casos posibles de DANAs identificadas en el paso 1 fue de 7946, mientras que en paso 2, tras imponer las restricciones definidas, fue de 3003, y en el paso 3 fue de 2362 –figura 5.3–.

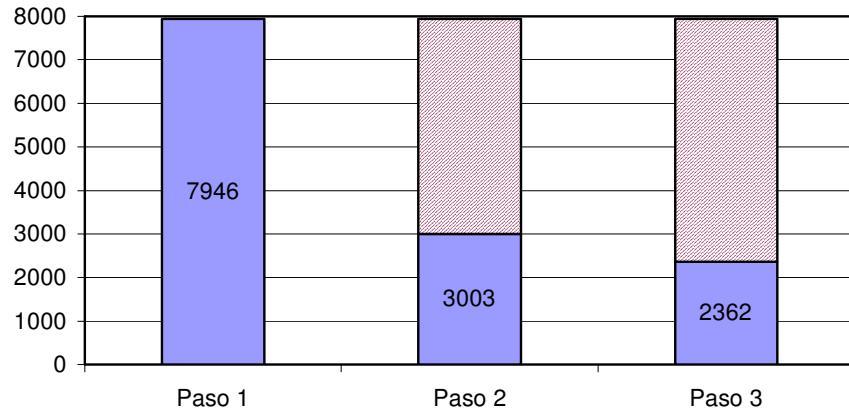


Figura 5.3: Número de sistemas localizados para cada paso después de aplicar las restricciones a cada uno de ellos.

Como cabía esperar el número de sistemas identificados se reduce, quedando tan sólo para el paso 3 un 29.73% de los casos contabilizados en el paso 1, notándose en menor medida este descenso entre el paso 2 y el último, con una permanencia de casos de un 78.66% -tabla 5.1-.

	Nº de DANAs	Paso 1	Paso 2
Paso 1	7946		
Paso 2	3003	37.79%	
Paso 3	2362	29.73%	78.66%

Tabla 5.1: Porcentaje del número de DANAs que se mantienen desde el paso 1 al paso 2 y del paso 2 al paso 3.

De aquí en adelante todos los análisis se realizarán tan sólo para el paso 3, ya que éste es el que garantiza que realmente se están detectando DANAs.

Para un estudio con mayor detalle de las regiones más favorecidas en la ocurrencia de DANAs se muestra su distribución para los tres sectores preferentes en las figuras 5.4, 5.5 y en la III.2 del anexo. En la figura III.2 del anexo la escala de colores representa la densidad de DANAs por año y en la figura 5.5 los colores representados son relativos, indicando mayor número de

DANAs en color negro y disminuyendo a menor número hacia los colores amarillos.

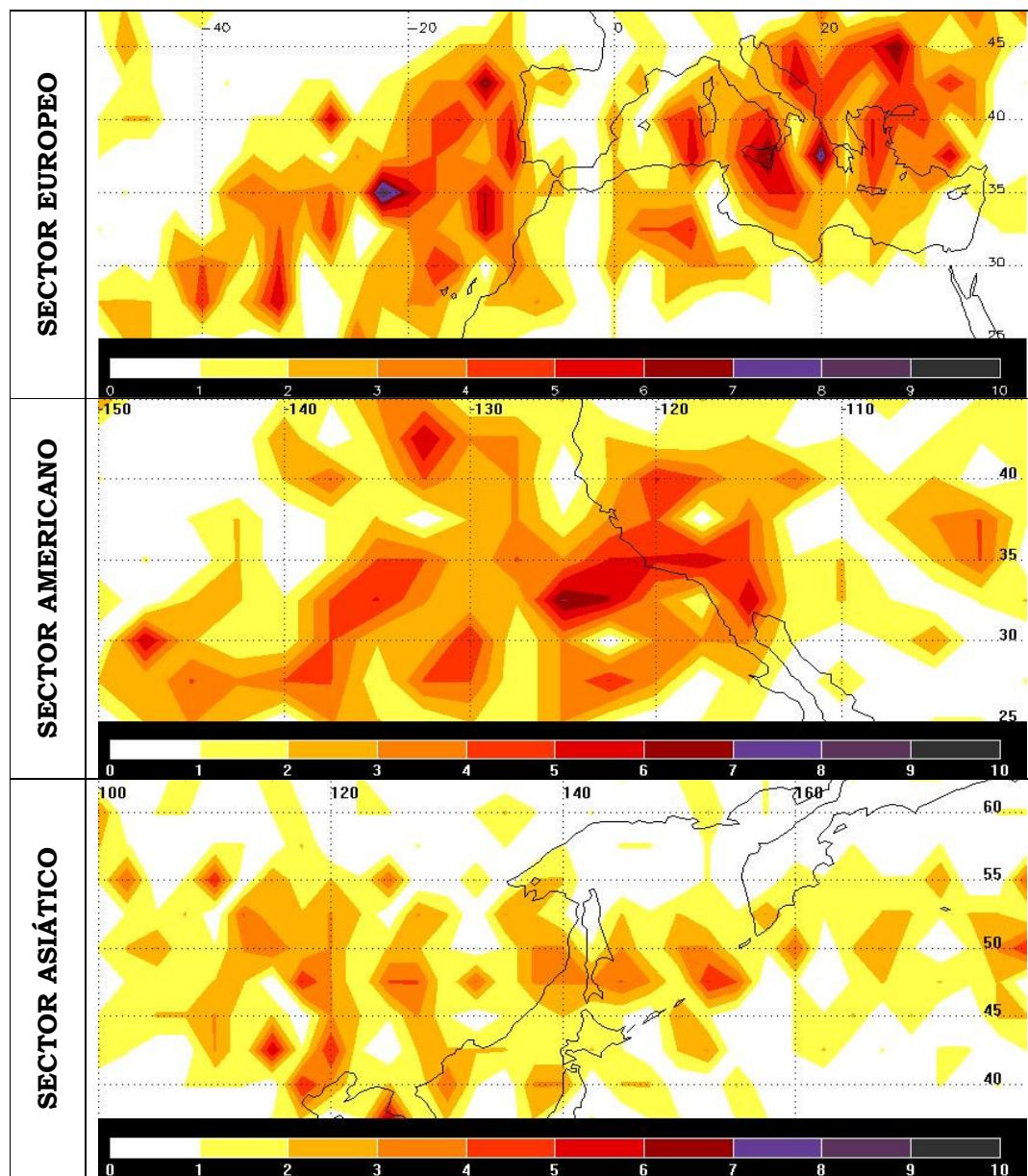


Figura 5.4: Número total de DANAs por punto de rejilla ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) para todo el periodo de 1958-1998 para las tres áreas de mayor ocurrencia.

En el sector Europeo se diferencian dos áreas de mayor frecuencia en la formación de DANAs, la región este del océano Atlántico y la parte sur del continente europeo incluyendo las regiones mediterráneas. Estas dos áreas preferentes también habían sido identificadas en la climatología previa de KD,

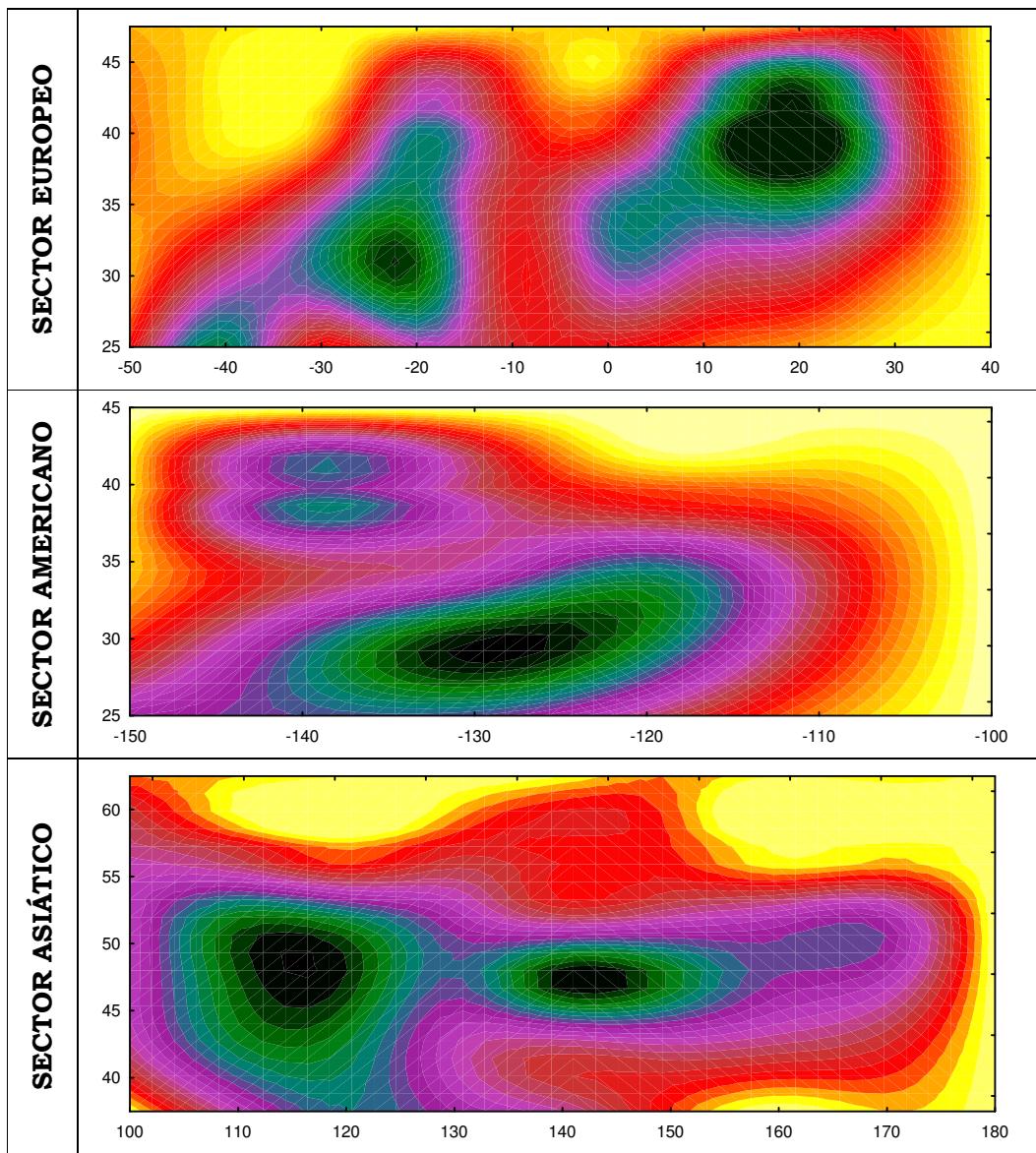


Figura 5.5: Versión suavizada del número total de DANAs para el periodo completo de estudio (1958-1998) calculada para una rejilla de 5° de latitud y 10° de longitud para las tres áreas de mayor ocurrencia.

así como también en el análisis de la distribución geográfica de ‘cold pools’ sobre Europa realizado por Llasat y Puigcerver (1990) y Llasat (1991). No obstante, el área más oriental, aquella que comprende desde la Península Itálica hasta los Balcanes, aparece definida de un modo más claro en nuestro análisis que en los previos. La distribución de DANAs de PV no se realiza con este detalle sobre Europa y los estudios de Hernández (1999) y Cuevas y

Rodríguez (2002), basados en máximos de vorticidad potencial, sólo encuentran un máximo cerca de la Península Ibérica. Aunque, difíciles de comparar por la distinta resolución de los datos las regiones de ocurrencia de DANAs en el Mediterráneo, las regiones de son claramente distintas a los ciclones en superficie (Trigo et al., 1999). Esto es debido, en gran medida, a sus mecanismos de génesis tan diferentes en primavera y verano; aislamiento de circulación general para las DANAs y bajas inducidas térmicamente junto con forzamiento orográfico para los ciclones en superficie (Trigo et al. 2002).

En el sector Americano se observan dos áreas de mayor ocurrencia, encontrándose una desplazada hacia latitudes más altas que la otra. Esto puede ser causado por el ciclo estacional, puesto que el principal mecanismo responsable de la formación de las DANAs –desplazamiento meridional de la corriente en chorro- muestra un marcado ciclo estacional en su comportamiento.

En el sector Asiático el máximo de frecuencia de ocurrencia de DANAs se distribuye en forma de “banda” entre las latitudes de 42.5° y 55°N.

El uso de datos de reanálisis de NCAR/NCEP para una serie temporal larga, como es el caso de 41 años, puede introducir heterogeneidades en los resultados, debido a la introducción de datos de satélite a partir de 1979 en el reanálisis, lo cual puede derivar en inducir saltos en datos climatológicos (Ribera y Mann, 2002). Para comprobar si estas heterogeneidades en los datos del reanálisis afectan a los valores climatológicos obtenidos para las DANAs se divide el periodo de estudio en dos subperiodos, desde 1958 hasta 1978, ambos incluidos -datos del reanálisis previos a la introducción de datos de satélite- y a partir de 1979 hasta 1998. Los resultados, tanto para la distribución hemisférica como para el sector Europeo, figuras 5.6 y 5.7, muestran que no existen diferencias claras, viéndose el mismo tipo de distribución en la ocurrencia de DANAs, con tres áreas de máxima ocurrencia en posiciones similares a las derivadas del análisis del periodo completo.

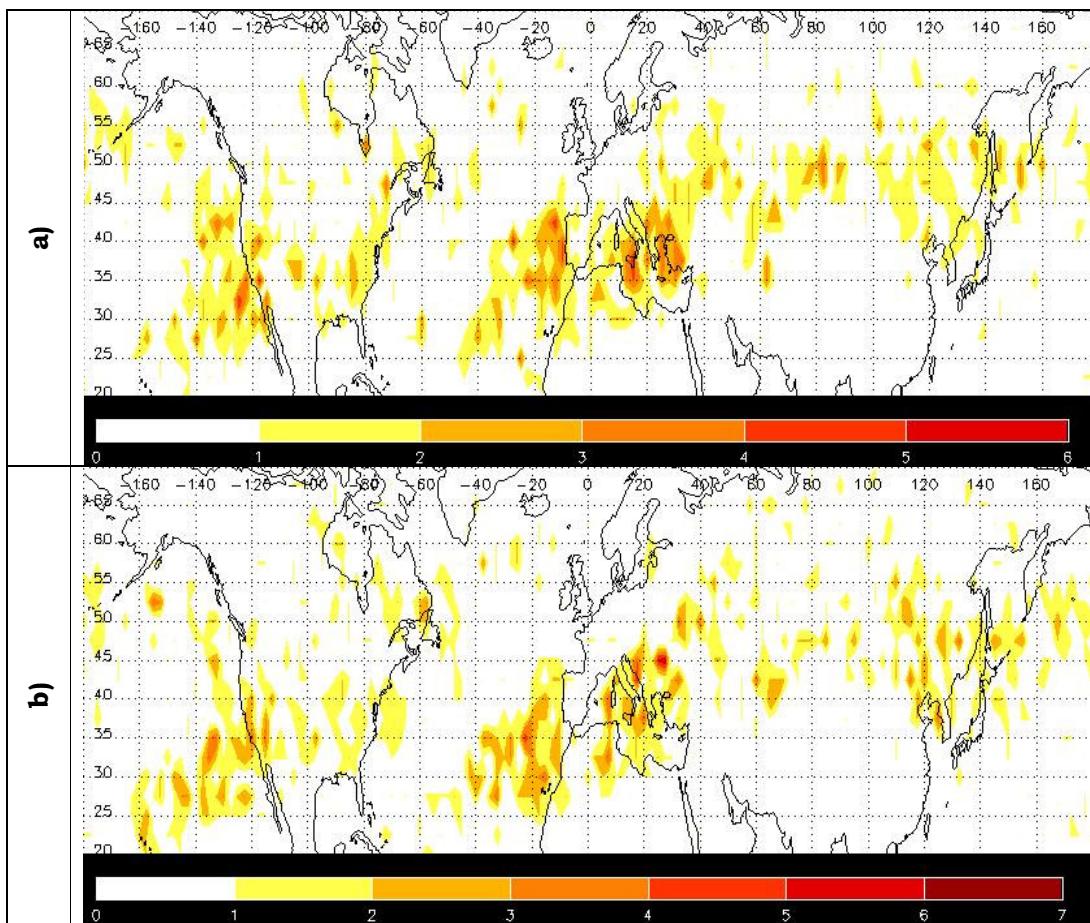


Figura 5.6: Número total de DANAs el hemisferio Norte por punto de rejilla ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) para los subperiodos (a) 1958-1978 y (b) 1979-1998.

5.2 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE DANAS EN EL HEMISFERIO NORTE

5.2.1 Antecedentes

Los estudios climatológicos previos muestran que los sistemas de depresiones aisladas en niveles altos son mucho más frecuentes y comunes en el hemisferio Norte durante los meses de verano, particularmente en junio y julio. PV encontraron que el 30% de las DANAS ocurrían durante estos dos meses. KD corroboraron esto viendo que en los años comprendidos entre 1990 y 1994, ambos incluidos, el 35 ó 40% de las DANAS que se formaban lo hacían durante el verano, con mayor incidencia durante el mes de junio. La

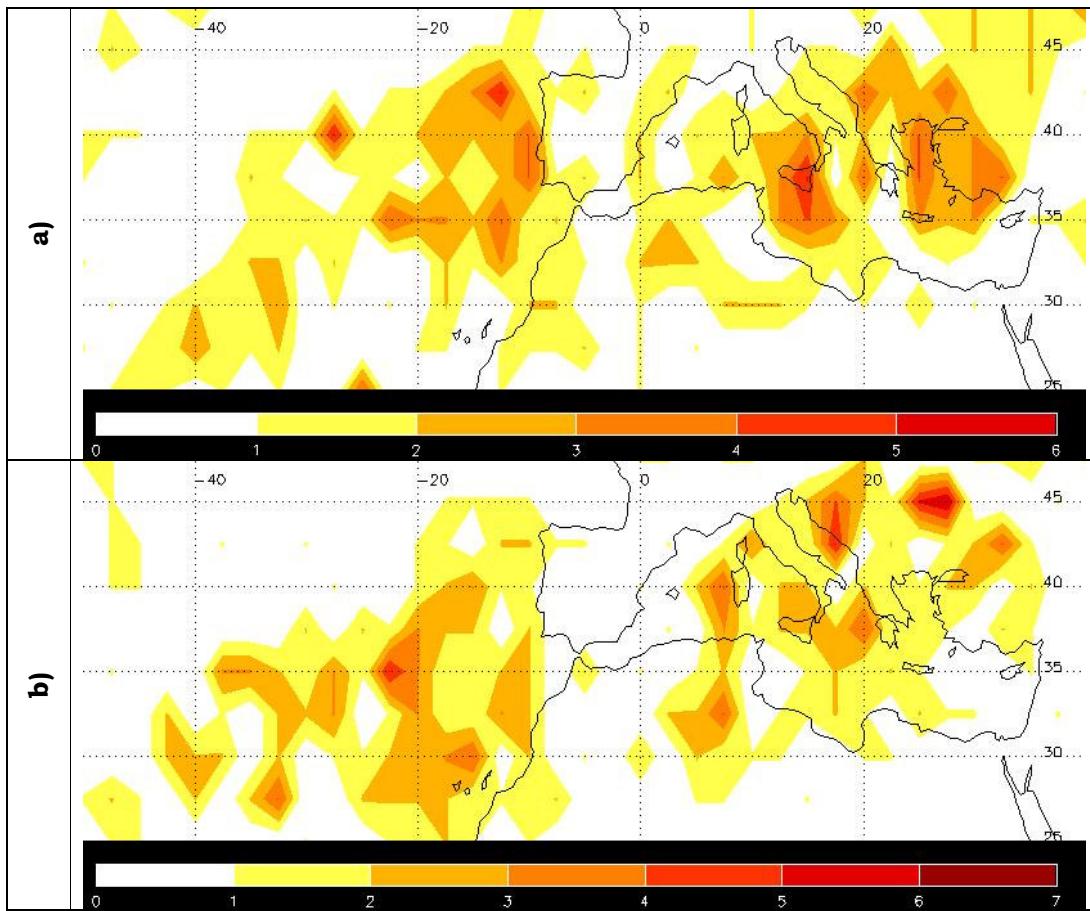


Figura 5.7: Número total de DANAs el sector Europeo por punto de rejilla ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) para los subperiodos
(a) 1958-1978 y (b) 1979-1998.

estación en la cual las DANAs se desarrollan con mayor dificultad es durante el invierno, obteniendo PV tan sólo el 9% para los meses de diciembre y enero, y el 15% para toda la estación. Durante las estaciones de primavera y otoño ocurren aproximadamente un 24% del número total de DANAs.

El incremento de DANAs en los meses de verano está relacionado con el cambio estacional en el comportamiento del *jet stream*. Durante el invierno el *jet* es más fuerte debido al incremento del gradiente meridional de temperatura. Durante el verano se produce un incremento del flujo meridional en el hemisferio debido al debilitamiento de los *jets* y al calentamiento de las zonas continentales que disminuyen el gradiente de temperatura, teniendo como resultado una mayor formación de DANAs.

PV, en su estudio, distinguieron tres tipos de DANAs según la naturaleza del *jet* que produce su formación. Los tres tipos fueron denominados como '*polar*', '*subtropical*' y '*polar vortex*', cada uno con características propias. Las de tipo '*polar*' se forman por extensiones hacia el Ecuador del *jet* polar, las tipo '*subtropical*' se forman o por extensiones del *jet* subtropical o por una escisión del *jet* polar hacia el Ecuador. Este último tipo es el más común y se caracteriza por un contraste más pequeño de temperatura y por un flujo más estrecho alrededor de su perímetro. Se encuentran habitualmente en latitudes menores que las de tipo '*polar*' y contienen en su interior aire procedente de latitudes medias. Las DANAs de tipo '*polar*' producen mayor actividad frontogenética en niveles altos (Danielsen, 1968; Keyser y Shapiro, 1986). Las DANAs de tipo '*polar vortex*' son sistemas que se forman de una derivación del propio vórtice polar. Esto ocurre normalmente cuando el vórtice polar se mueve hacia el Ecuador unos 15° y la DANAs se forma a partir de la vaguada resultante. No están asociadas necesariamente a sistemas de altas presiones bloqueantes, pero pueden tener fuertes gradientes de geopotencial y circulación ciclónica en superficie. Estas DANAs no se separan del vórtice polar, a diferencia de los otros tipos que sí se desligan del *jet*, y contienen aire en su interior de procedencia ártica.

La distribución estacional para los tres tipos de DANAs parece ser la misma, lo cual es consistente con el hecho de que el mecanismo de formación de estos sistemas es similar.

Para examinar diferencias en la distribución estacional con la latitud, KD también diferenciaron entre las DANAs que se forman por debajo de 40°N (región influenciada por el *jet stream subtropical*) y las que se generan entre 40°N y 70°N (influenciada por el *jet polar*). Restringieron el estudio al sector 'Europa' (40°W-50°E). La distribución estacional de estos dos grupos muestra un patrón similar, con el máximo de ocurrencia durante el verano y el mínimo en invierno, indicando que el mecanismo responsable de su formación –incursiones meridionales del *jet stream*– está sujeto también a ciclos estacionales similares, tanto si las DANAs se forman en latitudes bajas como medias.

El mismo patrón de ocurrencia se muestra para la región comprendida entre 60°W-30°E y 80°N-20°N en el estudio de Cuevas y Rodríguez (2002), obteniendo un máximo en todo el dominio en los meses de junio y julio, y

valores mínimos en el periodo invernal, siendo la frecuencia absoluta en esta estación entre un 30% y un 50% inferior que la registrada en verano.

5.2.2 Resultados

La ocurrencia estacional de DANAs muestra el mismo tipo de distribución para los tres sectores -figura 5.8-. Las DANAs se forman con mucha más frecuencia durante los meses de verano -julio, agosto y septiembre (JAS)-. En efecto, en el sector Europeo el 44.6% de las DANAS que se forman lo hacen durante dicha estación, en el sector Americano el 49.5% y en el Asiático el 58.4%. La estación en la cual las DANAs se desarrollan con mayor dificultad es durante el invierno -enero, febrero y marzo (EFM)-, tan sólo un 10.6%, 3.5% y 5.6% del total de DANAs para los sectores Europeo, Americano y Asiático respectivamente. Estos resultados concuerdan con las climatologías parciales previas realizadas por PV y KD, que atribuían estas diferencias intraestacionales al debilitamiento de la corriente en chorro durante la estación de verano, que permite mayores flujos meridionales y, por lo tanto, un incremento en la probabilidad de formación de DANAs.

Para analizar si las heterogeneidades introducidas en el reanálisis NCAR/NCEP pueden afectar a los resultados de la distribución estacional antes o después de 1978, se divide el periodo de estudio entre 1958-1978 y 1979-1998. La distribución estacional del número de DANAs fue similar para el periodo total analizado (1958-1998) y para los dos subperiodos -tabla 5.2-.

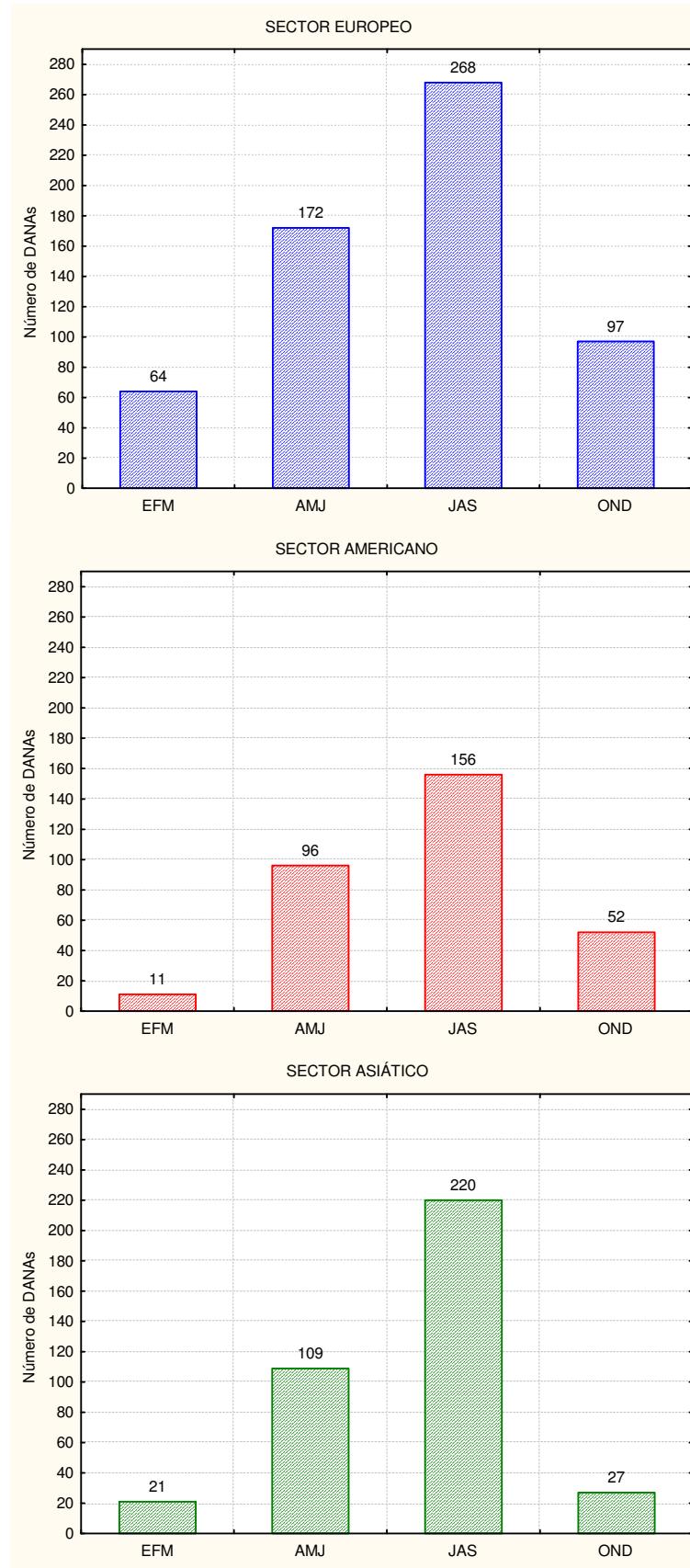


Figura 5.8: Distribución estacional del número de DANAs para los tres sectores de mayor ocurrencia.

		INVIERNO (EFM)		
Periodo	EUROPEO	ASIÁTICO	AMERICANO	
1958-1998	10.64	5.57	3.49	
1958-1978	11.39	3.88	4.82	
1979-1998	9.82	7.10	2	

		PRIMAVERA (AMJ)		
Periodo	EUROPEO	ASIÁTICO	AMERICANO	
1958-1998	28.62	28.91	30.47	
1958-1978	32.59	31.66	20.09	
1979-1998	24.21	26.40	32	

		VERANO (JAS)		
Periodo	EUROPEO	ASIÁTICO	AMERICANO	
1958-1998	44.59	58.35	49.52	
1958-1978	40.82	56.11	51.51	
1979-1998	48.77	60.41	47.33	

		OTOÑO (OND)		
Periodo	EUROPEO	ASIÁTICO	AMERICANO	
1958-1998	16.14	7.16	16.51	
1958-1978	15.19	8.33	14.54	
1979-1998	17.19	6.09	18.67	

Tabla 5.2: Distribución estacional del porcentaje de DANAs *versus* el número total anual para el periodo total (1958-1998) y para los dos subperiodos (1958-1978 y 1979-1998) para los tres sectores de máxima ocurrencia de DANAs.

Para conocer las diferencias geográficas en la distribución estacional analizamos el número de DANAs para cada estación del año y para cada sector de ocurrencia por separado –figuras 5.9.a, b y c-. En estas gráficas el área que aparece coloreada en tono amarillo engloba al menos el 95% del número total de casos de DANAs. Sobre estas áreas coloreadas se marcan los lugares donde ocurre más de una DANA con el número correspondiente a las veces que se repite la aparición de un sistema sobre el mismo punto de rejilla en el periodo que se está analizando.

Los mapas obtenidos demuestran que existe una variación estacional significativa en las regiones de ocurrencia de las DANAs. Así se puede observar que en el sector Europeo la mayor parte de estos sistemas se forman en el norte de África y el sur de Europa durante el invierno y que durante el resto del año esta región de mayor formación de DANAs se desplaza hacia latitudes más altas –figura 5.9.a-.

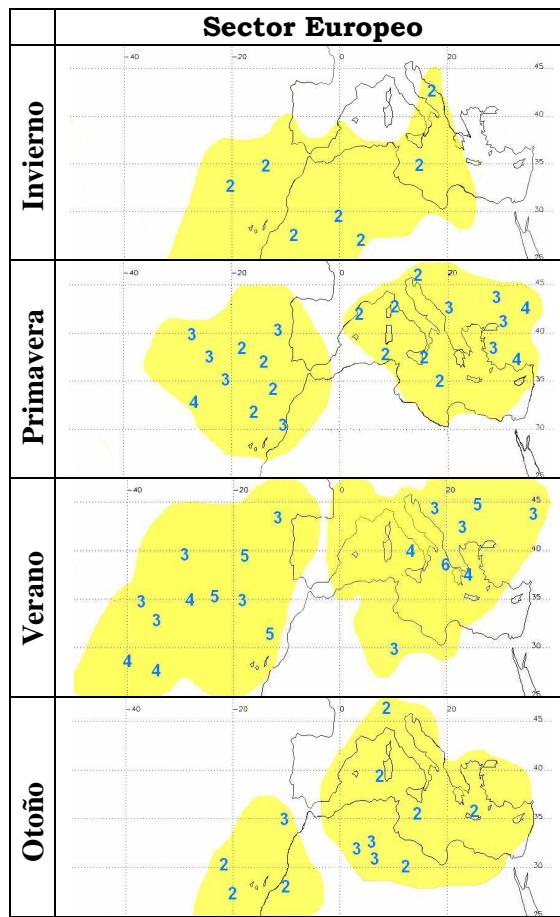


Figura 5.9.a: Número de DANAs en el paso 3 para cada estación del año para el sector Europeo. Las áreas de color amarillo representan el conjunto de al menos el 95% del total del número de las DANAs para cada estación. Los números en azul marcan el lugar donde existe más de una DANAs durante ese periodo.

En el sector Americano –figura 5.9.b-, el área de ocurrencia de DANAs durante el invierno se encuentra limitada a la costa del Pacífico, expandiéndose y desplazándose hacia el oeste y el norte a lo largo de la primavera y el verano. También se observa que en los meses de verano esta área de ocurrencia está claramente localizada sobre el océano Pacífico, siendo el porcentaje de DANAs que ocurren sobre el continente mucho más reducido que durante la primavera. Durante el otoño el desplazamiento ocurre en sentido inverso, localizándose en esta estación la mayoría de las DANAs a latitudes inferiores a 35°N y cercanas a la costa americana.

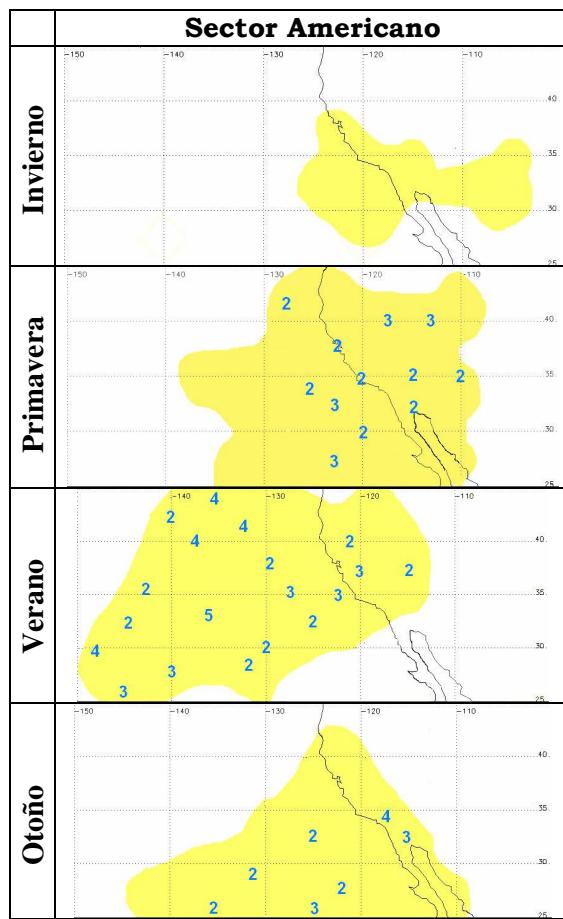


Figura 5.9.b: Número de DANAs en el paso 3 para cada estación del año para el sector Americano. Las áreas de color amarillo representan el conjunto de al menos el 95% del total del número de las DANAs para cada estación. Los números en azul marcan el lugar donde existe más de una DANAs durante ese periodo.

Sobre el sector Asiático ocurre algo muy similar, el área de ocurrencia de DANAs está reducida a la costa japonesa en invierno, expandiéndose durante los meses de primavera y verano, alcanzando en esta última estación una extensión sobre el continente mayor que sobre el océano –figura 5.9.c–.

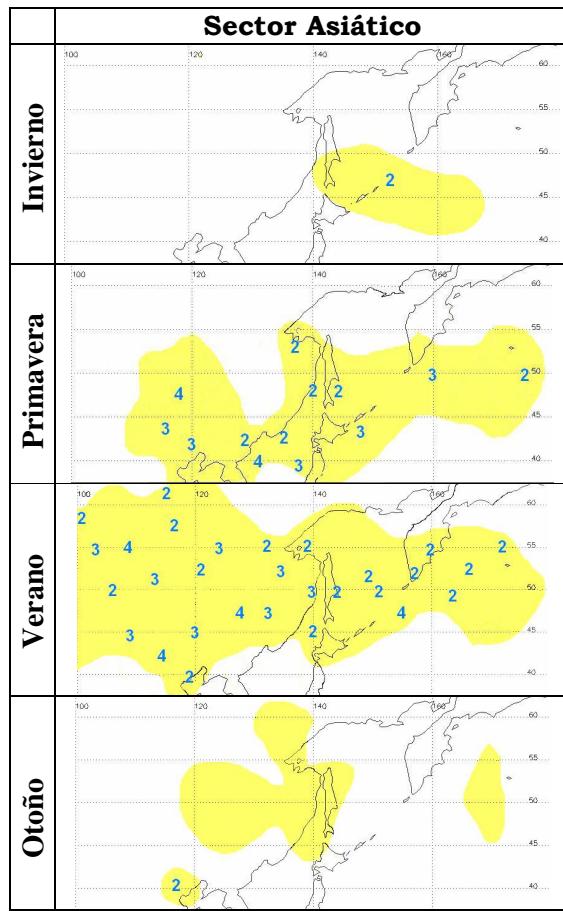


Figura 5.9.c: Número de DANAs en el paso 3 para cada estación del año para el sector Asiático. Las áreas de color amarillo representan el conjunto de al menos el 95% del total del número de las DANAs para cada estación. Los números en azul marcan el lugar donde existe más de una DANA durante ese periodo.

5.3 DURACIÓN Y TRAYECTORIAS DE LAS DANAS EN EL HEMISFERIO NORTE

5.3.1 Antecedentes

Una DANA duraría aproximadamente dos días antes de ser destruida por calentamiento no adiabático (Hoskins et al., 1985) si no se produjese inyección de aire en su interior con alta vorticidad potencial (Price y Vaughan, 1993), lo que alargaría su vida. No obstante la mayoría de las DANAs tienen

un periodo de vida corto. KD encontraron que la mayoría de las DANAs duraban entre 2 y 3 días y muy pocas superaban los 10 días. PV, en su estudio, vieron que las DANAs tienen un periodo de vida comprendido entre 1 y 17 días, aunque la mayoría son de corta duración. Para el análisis que realizaron desde octubre de 1982 a septiembre de 1983 obtuvieron los siguientes resultados: el 73.5% de las DANAs registradas tenían una duración como máximo de 3 días (siendo el 41% de éstas de tan sólo 1 día de duración), el 20.8% de 4 a 7 días, 4.8% de 8 a 14 días y sólo 0.9% con una duración de más de 14 días -tabla 5.3-. También encontraron diferencias de duración atendiendo a los diferentes tipos en los que clasificaron las DANAs -tabla 5.4-. El resultado es que el 90% de las DANAs de tipo '*subtropical*' duran 3 o menos días y no se observa ninguna de más de 6 días. La duración media de este tipo de DANAs (eliminando las que tan sólo duran 1 día) es de 2.9 días. Las DANAs de tipo '*polar*' muestran una mayor longevidad, con una duración media de 4.2 días (excluyendo las de 1 día de duración). El 70.1% del total de DANAs no superan los 3 días, el 24.8% duran entre 4 y 7 días, el 4.3% entre 8 y 14 y de más de 14 días sólo se contabiliza un 0.8%. Las DANAs que mayor tiempo de vida presentaron son las de tipo '*polar vortex*', de las cuales no encontraron ninguna por debajo de 3 días y la mayoría de ellas tienen un tiempo de residencia de 4 a 8 días, representando el 70% del total de las analizadas de este tipo. Su duración media es de 7.2 días. Aunque las DANAs de este tipo sean mucho más duraderas que las anteriores hay que tener en cuenta que el número de sistemas de este tipo es mucho menor que el de los otros dos, por lo que en el cómputo final no tienen gran incidencia.

Para poder hacer un estudio con mayor seguridad estadística, PV llevaron a cabo un análisis de un periodo de 5 años -desde 1985 a 1989, ambos incluidos-, concentrándose en aquellos eventos de duración mayor, los cuales en su opinión eran los de importancia para el intercambio entre troposfera y estratosfera (STE). Por esta razón sólo incluyeron en el estudio los tipos de DANAs '*polar*' y '*polar vortex*' con la excepción del año 1985 (primer año que analizan) en el que realizaron un análisis más exhaustivo, contabilizando todos los tipos de DANAs. Esto permite comparar los datos de 1985 más fácilmente con los de 1982/83 -tabla 5.3-. Para 1985 la distribución de duraciones es similar a la de 1982/83 -73.6% para las DANAS de 3 o menos días, 21.1% de 4 a 7 días y el 5.3% para las de más de 7 días-.

		AÑO	
		1982-1983	1985
		Total DANAs: 226	Total DANAs: 227
≤ 3 días	Total	166 (73.5%)	167 (73.6%)
	P	82 (49.4%)	
	S	81 (48.8%)	
	Pv	3 (1.8%)	
4 - 7 días	Total	47 (20.8%)	48 (21.1%)
	P	29 (61.8%)	
	S	9 (19.1%)	
	Pv	9 (19.1%)	
8 - 14 días	Total	11 (4.8%)	12 (5.3%)
	P	5 (45.5%)	
	S	0 (0%)	
	Pv	6 (54.5%)	
> 14 días	Total	2 (0.9%)	
	P	1 (50%)	
	S	0 (0%)	
	Pv	1 (50%)	

Tabla 5.3: Análisis de la duración de las DANAs para el periodo 1982/83 y para el año 1985 realizado por PV, haciendo distinción entre el tipo de DANAs (tipo ‘polar’ (P), tipo ‘subtropical’ (S) y tipo ‘polar vortex’ (Pv)).

Duración (días)	Nº total de DANAs	TIPO DANA		
		‘polar’	‘subtropical’	‘polar vortex’
	TOTAL : 226	117 (51.8%)	90 (39.8%)	19 (8.4%)
≤ 3	166	82 (70.1%)	81 (90%)	3 (15.8%)
4 - 7	47	29 (24.8%)	9 (10 %)	9 (47.3%)
8 - 14	11	5 (4.3%)	0 (0%)	6 (31.6%)
> 14	2	1 (0.8%)	0 (0%)	1 (5.3%)
Duración media (*)		4.2 días	2.9 días	7.2 días

(*)eliminando las DANAs de 1 día de duración

Tabla 5.4: Duración de las DANAs analizadas por PV atendiendo al tipo de DANA al cual pertenezcan.

Asimismo encontraron que para 1985 las regiones donde mayor era la concentración de DANAs de duración de más de 4 días eran ‘Europa’ y el ‘Pacífico Norte’, resultado similar al del periodo 1982/83. Para el periodo 1986/89 se obtiene un resultado semejante, siendo de nuevo ‘Europa’ la región más favorecida en la formación de DANAS del tipo ‘*polar*’ y ‘*polar vortex*’ que duran de 7 a 10 días, incluso superando al resto de regiones en algo más del doble. La región ‘Pacífico Norte’ es la más prolífica en las de tipo ‘*polar vortex*’. En apariencia, según los resultados obtenidos por PV, un año “típico” en el hemisferio Norte tienen lugar aproximadamente 20 casos de DANAs de duración de una semana o superior.

Estos resultados son confirmados por KD, encontrando que para el periodo de su estudio -1990/95- la distribución es la que se muestra en la tabla 5.5. También en el análisis por sectores geográficos del hemisferio Norte los resultados fueron semejantes, siendo ‘Europa’ la región con mayor número de eventos de duración de 2-3 días -70% del total-, y ‘Siberia’ con la mayor frecuencia de DANAs de duración mayor de 7 días, donde aproximadamente el 14% del total del número de DANAs son de esta duración.

Año	Total DANAs	≤ 3 días	4 - 7 días	>7 días
1990/95	1214	62%	29%	9%

Tabla 5.5: Distribución de las duraciones de las DANAs para el sector ‘Europa’ definido por KD.

En estudios de casos particulares de DANAs los resultados son bastante parecidos. En general se han estudiado DANAs que duraban menos de cinco días (Eber et al. 1991; Langford et al., 1996) con algunos estudios más aislados de DANAs menores de ocho días (Ravetta y Ancellet, 2000; Gouget et al. 2000)

En lo que concierne a la movilidad o trayectorias se piensa de modo tradicional que las DANAs son cuasiestacionarias. Esta idea viene del trabajo de Bell y Bosart (1989) quienes encontraron que las DANAs se formaban y se disipaban en áreas del Mediterráneo que se encontraban muy próximas, por lo que concluyeron que las DANAs podrían ser cuasiestacionarias. Sin embargo

en el análisis llevado a cabo por PV se observa que al menos la mitad de los sistemas tenían un movimiento considerable (entre 600-700 Km), siendo las de tipo subtropical las de mayor movilidad (el 47% tienen un movimiento significativo) y las más próximas a 70°N las de menor movimiento. La variación en su posición suele ser, o bien en latitud, o bien en longitud, aunque pocas muestran un movimiento significativo, tan sólo un 20%. Este resultado fue constatado por KD quienes ligaron la duración de las DANAs con su movilidad encontrando que aproximadamente el 50% de los sistemas que duran más de 3 días se desplazan distancias muy apreciables, superiores a 600 km. En algunos casos el recorrido es mayor a 1500 km, siendo éstas las más largas en duración. De acuerdo con estos autores el movimiento de las DANAs es, como norma general, irregular, con una tendencia al desplazamiento hacia el norte o hacia el noreste antes de comenzar su declinación.

En el estudio realizado por Hernández (1999) se hace un análisis más detallado de 271 DANAs sobre la región sureste de Europa, encontrando dos tipos de comportamiento, aquellas que son cuasiestacionarias y otras que se mueven en sentido ciclónico con una media de giro de 20° en 12 horas y un movimiento máximo de 8.75° en longitud y 6.25° en latitud en un periodo de 12 horas. No obstante la autora reconoce que la representatividad de este resultado es débil debido a la alta varianza en el movimiento de las DANAs.

5.3.2 Resultados

Abordamos en primer lugar el estudio de la duración de las DANAs. Como se ha comentado, para seguir el mismo criterio que en climatologías previas (KD y PV), eliminamos aquéllas que tengan tan sólo un día de vida. La figura 5.10 muestra, para los tres sectores de mayor ocurrencia de DANAs, el número de sistemas cuya duración es de 2 o más días. Las conclusiones a las que se llega son las mismas en los tres sectores: la mayoría de las DANAs duran tan sólo dos días. Para el sector Europeo el número de DANAs de dos días reúne el 76% del total, en el sector Americano aúna el 74.3% y para el sector Asiático el 80.3%. También es destacable el hecho de que el número de eventos que duran más de cinco días es realmente muy pequeño, un 2.3%,

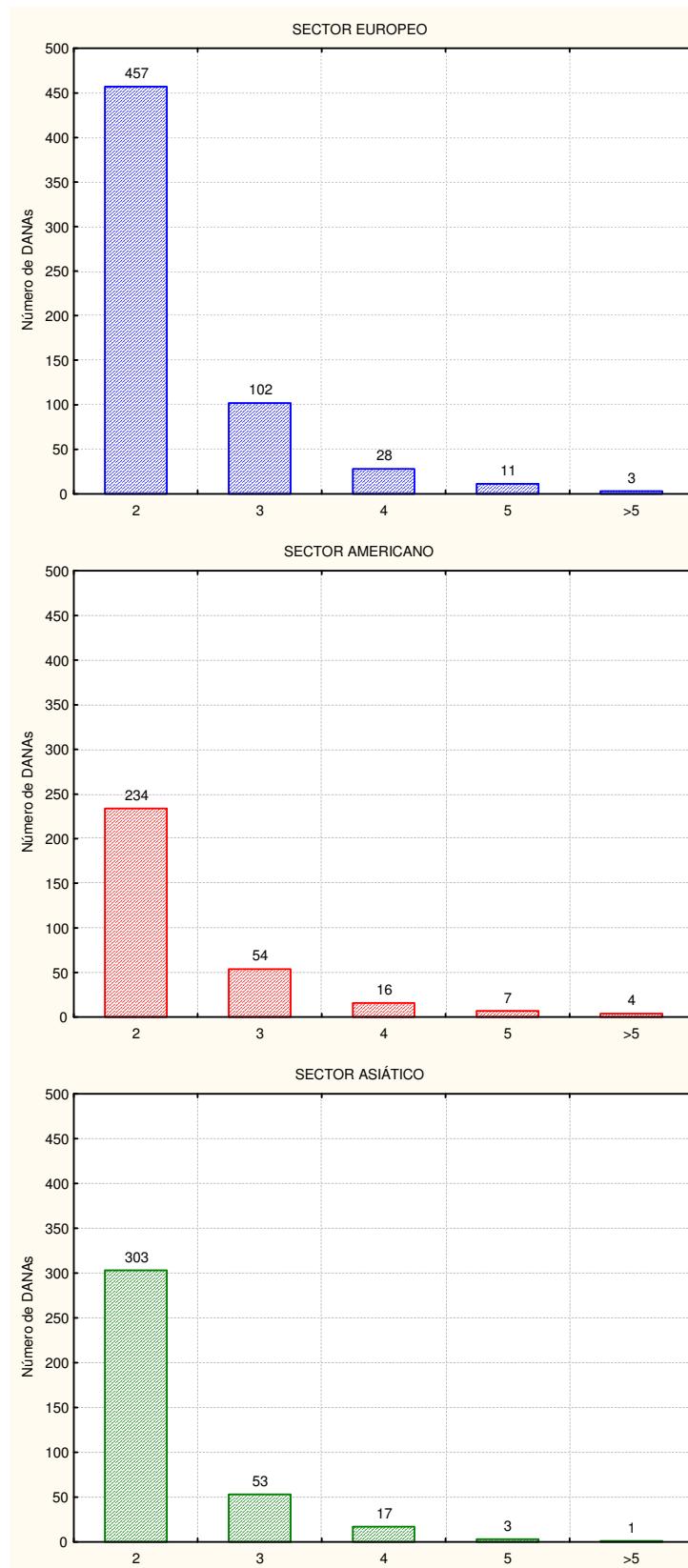


Figura 5.10: Número de DANAs para el paso 3 en función de la duración para los tres sectores de mayor ocurrencia.

3.5% y 1.1% para los sectores Europeo, Americano y Asiático respectivamente.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por KD y PV en cuanto a la mayor frecuencia de aparición de sistemas de corta duración. Sin embargo, nuestro trabajo muestra una disminución en la duración de las DANAs, llegando sólo unas pocas a siete días, mientras que en sus climatologías llegan a registrar sistemas de hasta 10 días. Esto puede deberse a dos motivos:

- 1.- A la imposición de las tres condiciones en nuestro análisis (paso 1, 2 y 3) para cada día y
- 2.- Al hecho de considerar que se requiere que existan puntos contiguos de DANAs en días consecutivos para poder seguir considerando un sistema como la misma DANAs.

Para cuantificar la importancia de este segundo motivo se ha calculado, para el sector Europeo, el porcentaje de casos en los que puntos que han sido considerados pertenecientes a diferentes DANAs en días consecutivos puedan formar parte de una sola. En la figura 5.11-A se muestra un ejemplo de dos DANAs con puntos cercanos entre sí pero que no son adyacentes, por lo cual el método automático aplicado cuenta dos sistemas diferentes. Pero si se analiza pormenorizadamente la probabilidad de que se trate de la misma DANAs, ésta es alta. Podría tratarse de un sistema con un movimiento mayor de 2.5° , tanto en latitud como en longitud, para días consecutivos. Del total de DANAs encontradas en el sector Europeo tan sólo 16 casos de 601 (un 2.6%) se encuentran en esta situación. Como resultado se tendría que el número de DANAs de tres días se incrementaría en 8, reduciéndose el de dos días en 16 casos.

En la figura 5.11-B se muestra otro ejemplo semejante al anterior, pero en este caso la distancia entre los puntos de DANAs de días consecutivos es suficientemente grande como para que la probabilidad de que se trate de un mismo sistema sea muy reducida. Tan sólo se han encontrado 18 del total de 601 para el sector Europeo. Por lo que, teniendo en cuenta, que en este segundo ejemplo difícilmente se trata de los mismos sistemas, el porcentaje de errores inducidos por el método automático es despreciable. Por otro lado, el método automático es más restrictivo que los métodos subjetivos, dado que no se permiten discontinuidades en el cumplimiento de todas las condiciones impuestas, lo cual no sucede siempre en los casos subjetivos. En los análisis

subjetivos de KD y PV se permite continuar considerando una DANA, aun incumpliendo alguna de las condiciones, si el desarrollo posterior de la DANA se ajusta a lo esperado de acuerdo al modelo conceptual, especialmente con

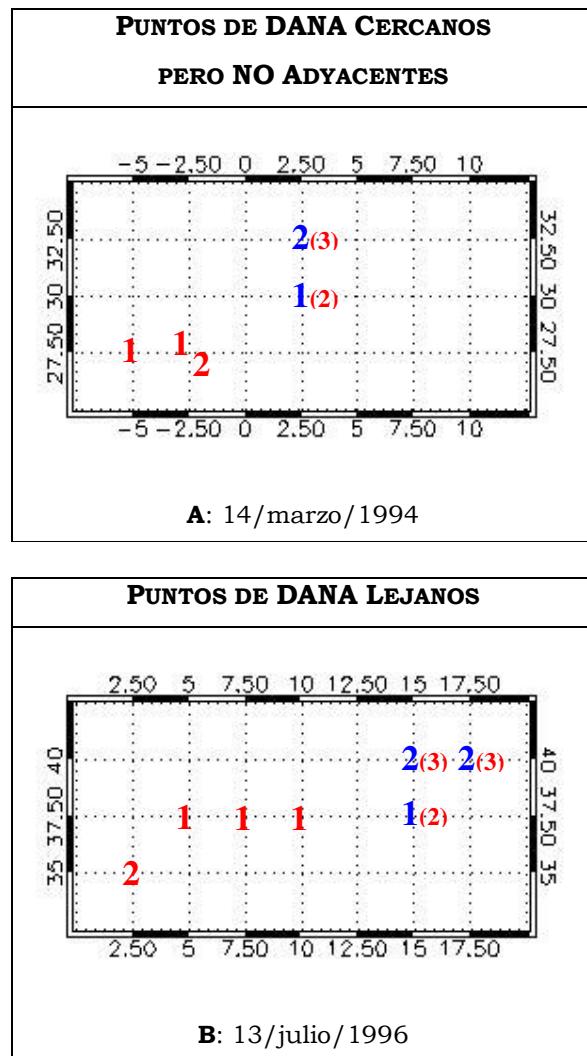


Figura 5.11: Ejemplo de dos situaciones de DANAs encontradas en días consecutivos con puntos de DANA no adyacentes que podrían ser el mismo sistema. En el caso A los puntos de DANA se encuentran lo bastante cerca en ambos días, por lo que la probabilidad de que se trate de la misma DANA es elevada. En casos como en el B la distancia entre los puntos es mayor y la probabilidad de que se trate de la misma DANA es muy reducida. Los puntos de DANA detectados como diferentes sistemas por el método aplicado en este trabajo se encuentran pintados en diferentes colores, en rojo la DANA que aparece primero. Los números indican el número del día de la vida de la DANA. Los números entre paréntesis en rojo, junto a los azules, indican el día que ocuparía la DANA marcada en azul si ésta fuese continuación de la roja. Por ejemplo, en el caso A, para la DANA marcada en rojo, el día 1 es el 14/marzo/94 y el 2 es el 15/marzo/94, mientras que para la azul el día 1 es el 15/marzo/94 y el 2 es el 16/marzo/94. El día 2 en rojo está muy cerca del día 1 en azul, de modo que el primer día de la segunda DANA (1 en azul) podría ser parte de la primera DANA en su segundo día (2 entre paréntesis en rojo).

respecto a la fase de aislamiento de la circulación general ('*cut-off*') en niveles troposféricos altos. Al permitir algunas discontinuidades en las condiciones características de DANAs los tiempo de vida de los sistemas son mayores. Este es el motivo de las pequeñas discrepancias detectadas en la comparación de las duraciones con estudios anteriores.

Como se ha comentado en el principio de este capítulo, KD y PV encontraron en sus estudios que las DANAs de tipo '*subtropical*' duran mayoritariamente entre 2 y 4 días, mientras que las de tipo '*polar*' se mantienen durante más tiempo, la mayoría por encima de 5 días, es decir, que las DANAs meridionales duran menos que las septentrionales. Este resultado lo justifican por la inyección de aire polar que produce la reintensificación del proceso de formación de las DANAs de tipo polar, mientras que esto no sucede en aquellas que ocurren en la zona subtropical.

Para comprobarlo, representamos la duración de las DANAs en el paso 3 frente a la latitud y longitud que ocupan los sistemas -figura 5.12 a, b y c-. La superficie se ajustó usando el procedimiento de suavizado de división bicúbica ('*bicubic spline smoothing*'). Mediante puntos blancos se marcan sobre las figuras aquellos puntos de rejilla sobre los cuales hay al menos una DANA y los números subrayados indican la posición y la duración de las DANAs más duraderas. De estas figuras podemos observar que en los casos de los sectores Europeo y Americano las DANAs de mayor duración ocurren en las mismas regiones donde la densidad de frecuencia de ocurrencia es también mayor, lo cual indica que no existe una relación clara con la latitud, sin embargo para el sector Asiático el área donde aparecen las DANAs más duraderas -para latitudes superiores a 60°N- está claramente diferenciada del área de mayor ocurrencia de DANAs -banda entre las latitudes de 45° a 55°N-.

Esto confirma los resultados previos de KD sobre la dependencia de la duración de las DANAs con respecto a la latitud tan sólo para los casos de DANAs de tipo '*polar*', que son aquellas que se forman en latitudes superiores a 50°N, región considerada en el sector Asiático, pero no en el Europeo y Americano.

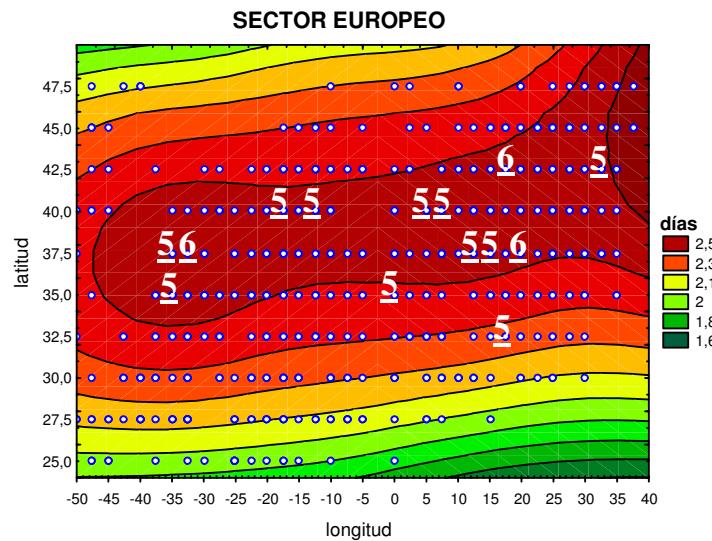


Figura 5.12.a: Representación de la duración de las DANAs en el paso 3 para el sector Europeo frente a la latitud y longitud que ocupan los sistemas (la superficie se ajustó usando el procedimiento de suavizado de división bicúbica ('bicubic spline smoothing')). Los puntos blancos representan aquellos puntos de rejilla sobre los cuales hay al menos una DANAs registrada y los números subrayados indican la posición y la duración de las DANAs más largas.

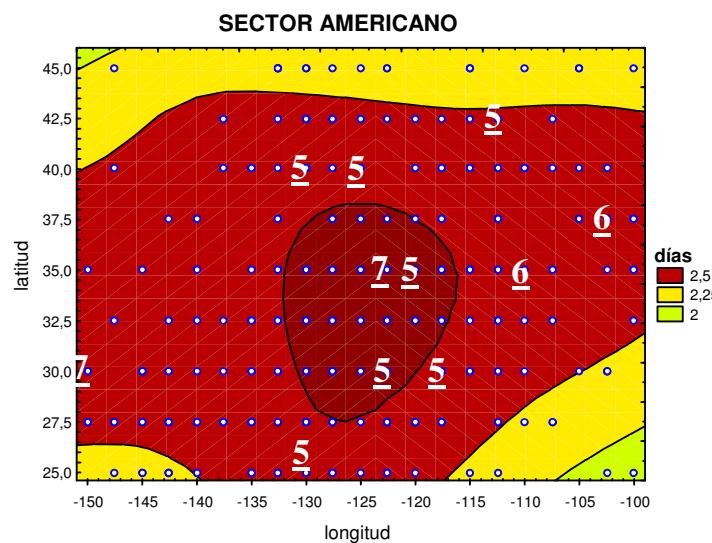


Figura 5.12.b: Igual que la figura 5.12.a pero para el sector Americano.

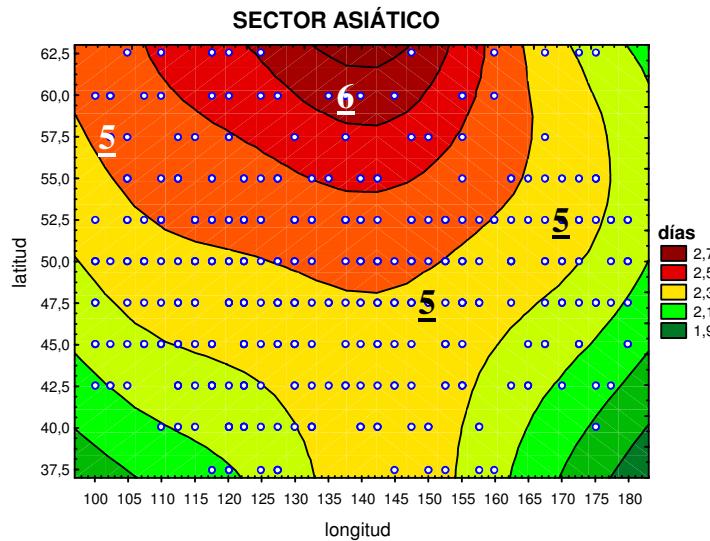


Figura 5.12.c: Igual que la figura 5.12.a pero para el sector Asiático.

La movilidad de las DANAs la analizamos calculando su desplazamiento diario considerando que el sistema es estacionario si el punto de rejilla que tomamos como representativo de la DANa se encuentra en la misma posición que el día anterior. En cualquier otro caso se identifica el movimiento mediante el desplazamiento de la posición del punto de rejilla representativo (PRR) de esa DANa. Consideramos que el sistema se mueve hacia el norte o hacia el sur si el PRR mantiene la longitud, hacia el este o el oeste si mantiene la latitud, y hacia el noroeste, noreste, suroeste y sureste para los movimientos entre los puntos cardinales principales. Para el análisis de las trayectorias no consideraremos la longitud del desplazamiento. Lo que pretendemos es explicar las diferentes trayectorias que toman las DANAs desde el primer día de ocurrencia hasta el segundo, desde el segundo al tercero, desde el tercero al cuarto y desde el cuarto en adelante (figura 5.13). Los resultados de ésta última transición -las trayectorias desde el cuarto día en adelante- deben de considerarse de una manera muy cautelosa, debido al reducido número de casos de DANAs de más de cinco días de duración.

Los resultados obtenidos muestran un menor número de casos de DANAs estacionarias de las que cabría esperar si los comparamos con las referencias de las climatologías previas (Bell y Bosart (1989), KD y PV); y

vemos como las DANAs tienden a moverse en cualquier momento de su ciclo de vida. Podemos ver en la tabla 5.6 como el porcentaje de sistemas estacionarios es muy similar en cualquiera de las transiciones, siendo en el sector Americano donde las DANAs tienden a ser más estacionarias.

DANAs Estacionarias			
	del 1º al 2º día	del 2º al 3er día	del 3er al 4º día
Sector Europeo	14.8 %	11.1 %	12.8 %
Sector Americano	<u>21.9</u> %	<u>17.3</u> %	<u>34.5</u> %
Sector Asiático	13.0 %	12.0 %	14.3 %

Tabla 5.6: Porcentajes de DANAs estacionarias para los tres sectores de estudio. Aparecen subrayados los valores más elevados.

Los resultados obtenidos por PV en lo referente a que las DANAs suelen moverse en latitud o longitud y muy pocas lo hacen en ambas direcciones no se desprende del análisis realizado en este trabajo como norma general. Tan sólo se encuentra que esta condición de movimiento –en latitud o longitud- se cumple en la transición del segundo día al tercero. En este paso la relación entre sistemas que se mueven sólo en latitud o longitud *versus* un movimiento combinado es de 1.66, 1.23 y 1.71 para los sectores Europeo, Americano y Asiático respectivamente.

Al igual que PV y KD encontramos dificultades considerables para definir las trayectorias preferentes de los sistemas de DANAs, ya que su movimiento parece ser bastante irregular. Para analizar las trayectorias más favorecidas estudiamos la relación entre los movimientos hacia el norte y hacia el sur. Para ello consideramos que se mueven en dirección norte si de un día a otro se mueven bien hacia el noreste, norte o noroeste; y consideramos movimiento hacia el sur si lo hace tanto hacia en sureste, sur o suroeste. En términos generales, la mayoría de las DANAs tienen un movimiento hacia el norte. El resultado del análisis de la relación entre ambas direcciones es de 1.78, 1.85 y 2.48 para las transiciones desde la posición del primer día al segundo para los sectores Europeo, Americano y Asiático respectivamente. Se encuentran resultados similares para las transiciones del

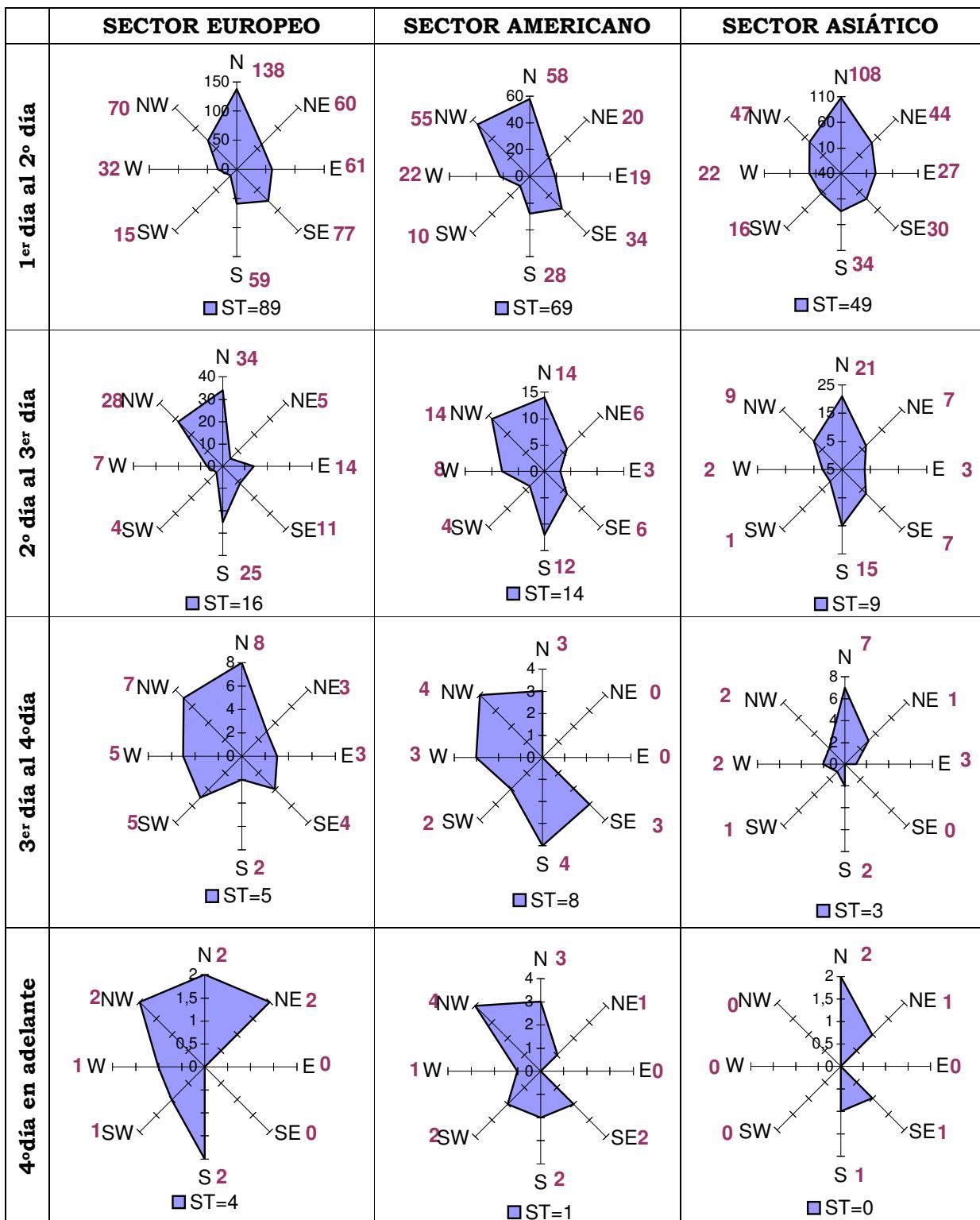


Figura 5.13: Movimiento diario de las DANAs del paso 3, calculado como el desplazamiento del punto de rejilla representativo de cada DANAs (ST: indica el n^o de sistemas estacionarios, N, NE, E, SE, S, SW, W y NW: indican el número de DANAs que se mueven hacia ese punto cardinal). El análisis fue hecho para cuatro transiciones desde el 1^{er} día de ocurrencia al 2^o, desde el 2^o al 3^{er}, desde el 3^{er} al 4^o y desde el 4^o en adelante.

segundo al tercer día (1.68, 1.55 y 1.60). En las transiciones desde el tercer día al cuarto este movimiento preferencial hacia el norte no se detecta en el sector Americano y no es representativo en ninguno de los sectores para el resto de transiciones. Estos resultados contrastan con los estudios de PV y KD, en los cuales el desplazamiento hacia el norte era más evidente en las últimas fases del desarrollo de los sistemas. Los posibles movimientos hacia el este sugeridos por KD no se confirman en nuestro estudio. En el sector Europeo las DANAs tan sólo tienen un movimiento hacia el este en la transición desde el primer día al segundo, y para el resto de los días el movimiento se produce hacia el oeste (entendiendo movimiento hacia el este a los producidos hacia el este, noreste o sureste, y hacia el oeste si se producen hacia el oeste, noroeste o suroeste). Las relaciones entre las transiciones al oeste y al este son 0.59, 1.30, 1.73 y 2.5 para las cuatro transiciones del sector Europeo. En el sector Americano las DANAs tienden a moverse hacia el oeste en cualquiera de las transiciones. La relación entre oeste y este es del siguiente modo: 1.20, 1.73, 3.0 y 3.5 para las cuatro transiciones respectivamente. En el sector Asiático el movimiento hacia el oeste tan sólo es dominante en las transiciones que se producen desde el segundo día al tercero y desde el tercero al cuarto día.

Capítulo 6:
Análisis de la
Precipitación y Nubosidad
asociadas a DANAs
en la Península Ibérica

6 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN Y NUBOSIDAD ASOCIADAS A DANAs EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

En este capítulo se analizan los fenómenos meteorológicos asociados a las DANAs para el dominio espacial de la Península Ibérica, determinando los patrones de precipitación y nubosidad que producen estos sistemas sinópticos cuando afectan a esta región en función de parámetros como su origen, época del año o latitud.

Aunque existe algún estudio previo de las precipitaciones y nubosidad asociadas a DANAs en la Península Ibérica (Martín León, 2003; Jansá, 2004) estos se hallan limitados a estudios de casos individuales y normalmente publicados en informes técnicos de limitada difusión científica. En este apartado el análisis se extiende a todas las DANAs ocurridas en la Península Ibérica entre 1958 y 1998.

Como se describió en el apartado 1.3, las DANAs se caracterizan por una nubosidad asociada al frente que se encuentra en el borde delantero del sistema, que es normalmente lo suficientemente espesa y desarrollada para producir precipitaciones. Cuando la DANA se encuentra sobre tierra, existirá una capa de nubes bajas su centro. Sobre superficies frías no existe convección y por lo tanto no se favorece la precipitación. Sobre océano, el aporte de humedad facilita la convección y aumenta la probabilidad de que se produzcan precipitaciones, que frecuentemente son fuertes o moderadas, y que durante el invierno pueden ser en forma de nieve. Las precipitaciones más fuertes ocurren cuando se forman células convectivas en el centro de la DANA. Sobre océano cálido durante el otoño, como es el caso de la Península Ibérica son frecuentes las inundaciones repentinas. Para las regiones subtropicales, como son las Islas Canarias, las DANAs son especialmente importantes en el régimen de precipitaciones. Además de la nubosidad asociada a la parte delantera de la DANA en algunos casos existe nubosidad asociada a frentes en el borde trasero del sistema que también pueden producir precipitaciones.

Para analizar el tiempo presente asociado a las DANAs se utilizarán datos de precipitación y de nubosidad procedentes de las bases de datos de las estaciones de la red principal del INM (figura 3.1 y tablas II.2 y II.3 del anexo), cubriendo el área de la Península Ibérica, excepto Portugal, y Baleares. La

región de estudio se centra en la Península Ibérica y Baleares, tomando las DANAs que ocurren en la zona delimitada entre -15°W y 10°E y entre 30°N y 50°N .

Se han utilizado dos criterios para estudiar cómo afectan estos parámetros a la Península. El primero de ellos consiste en analizar los efectos de las DANAs atendiendo a una división del espacio territorial que estamos tratando en una rejilla de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ y el segundo atendiendo a una división meteorológica de la Península, es decir, analizar los efectos que las DANAs provocan sobre las regiones que se definen climatológicamente a partir de patrones de precipitación.

Se dividió la región de estudio en recuadros de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (figura 6.1) para hacer el análisis de la precipitación y de la nubosidad referido a estos recuadros individualmente o a la unión de algunos de ellos.

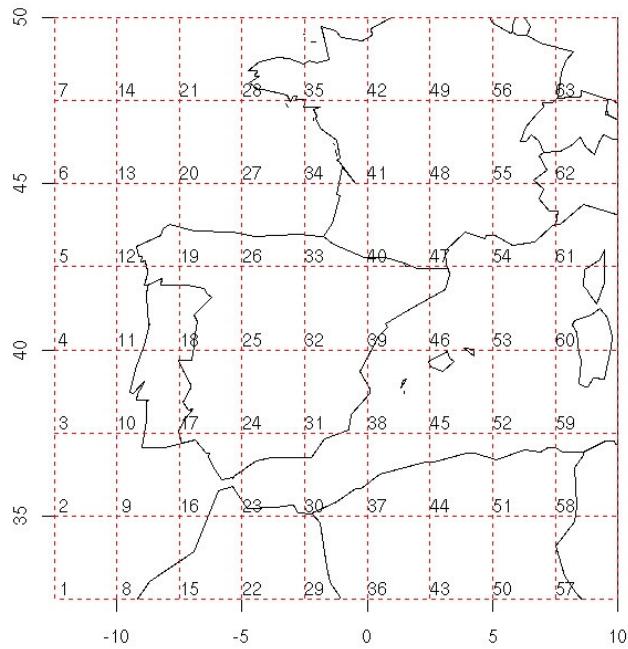


Figura 6.1: Región de análisis dividida en 63 recuadros de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$.

La metodología utilizada para aplicar los dos criterios citados anteriormente es la siguiente:

- Para el estudio basándose en la división del espacio en una rejilla de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (división espacial):

- se calcula la precipitación y la nubosidad media asociada para el primer día de ocurrencia de cada DANA, de las cuales conocemos su posición. Para esto se estudia lo que ocurre en cada una de las cajas en las que se ha dividido la Península. Habrá que tener en cuenta que, para calcular la media de las dos variables a analizar, las cajas no tienen la misma distribución de estaciones del INM, que fluctúan desde 1 estación (en las cajas que vienen numeradas con 19 ó 45) hasta 6 (en la caja 25).
- Para el estudio teniendo en consideración un punto de vista meteorológico de la Península:
 - en este caso para analizar la precipitación y la nubosidad asociada se dividió la Península Ibérica en tres regiones atendiendo a estudios previos sobre patrones principales de precipitación. Cabe destacar de estos estudios los realizados por Rodríguez-Puebla et al. (1998) quienes definieron, mediante el análisis de EOFs rotados, cuatro regiones preferentes de precipitación dentro de la Península. Estas cuatro zonas (figura 6.2) son la región del noroeste –primer EOF rotado de la

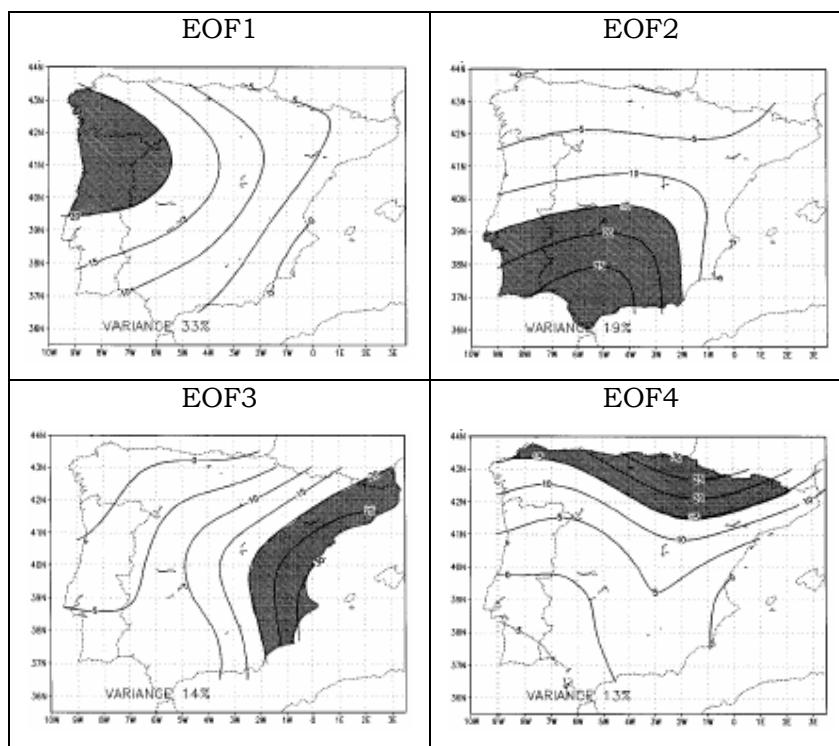


Figura 6.2: Distribución espacial de los EOFs rotados de la precipitación anual para la Península Ibérica (Rodríguez-Puebla et al. (1998)).

precipitación anual, representa el 33% del total de la varianza de la precipitación-, la zona del suroeste -segundo EOF, representa el 19% de la varianza-, la región del Mediterráneo –tercer EOF, explica el 14% de la varianza- y la zona del Cantábrico –cuarto EOF, explica el 13% del total de la varianza-.

Otro de los estudios para regionalizar la Península Ibérica en un número limitado de zonas climatológicamente homogéneas es el realizado por Muñoz-Díaz et al. (2004a,b). Para ello usan la técnica de conglomerados y el análisis de componentes principales basándose en la precipitación estacional para 32 localidades en el periodo comprendido entre 1912-2000. Obtienen tres conglomerados para el invierno y primavera –oeste y centro de la Península, costa mediterránea y la zona norte- y cuatro para el verano y otoño, cuando los mecanismos locales y convectivos son más importantes en la generación de precipitación. En la figura 6.3 pueden verse los conglomerados que obtuvieron para el invierno. Los resultados son similares aplicando el análisis de componentes principales.

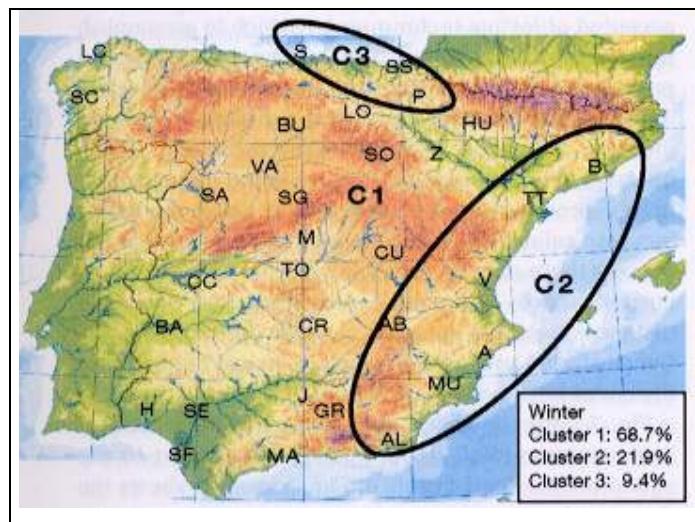


Figura 6.3: Regionalización para la estación de invierno determinada por los conglomerados (Muñoz-Díaz et al. (2004a,b)). En el recuadro se indica el porcentaje de observaciones que corresponden a cada conglomerado.

Aplicando también análisis de componentes principales, sobre datos mensuales de 40 estaciones meteorológicas, Serrano et al. (1999) definen siete patrones de precipitación en la Península Ibérica (un patrón atlántico, uno para la zona interior, otro para la zona sur peninsular, otro para Galicia y el norte de Portugal, otro para Cataluña, otro para la zona del Levante y otro para la región cantábrica). Representando todos unidos el 60.6% de la varianza de los campos mensuales de precipitación.

En el estudio de Martín-Vide (2004) se localizan dos regiones mediante la aplicación de un índice de concentración que evalúa el peso de la variación diaria de precipitación. Definió pues dos regiones claramente distinguibles: una fachada este, que presenta altos valores del índice de concentración y donde el 25% de los días de precipitación representan el 70% o más de la precipitación anual, y el resto del país, que presenta cantidades más irregulares de precipitación.

Por último el trabajo de Esteban-Parra (1998) analiza los valores de la precipitación anual y estacional de 40 localidades españolas para el periodo 1880-1992 aplicando análisis de componentes principales. Los resultados llevan a diferenciar tres regiones coherentes, el sur e interior de España, la costa este del Mediterráneo y la costa norte del Cantábrico. La región del sur e interior de la Península está asociada al primer EOF rotado (explicando el 31.2% del total de la varianza de la precipitación anual), la región mediterránea con el segundo y la cantábrica con el tercer EOF rotado (explicando el 13.2% y el 10.3% de la varianza de la precipitación anual respectivamente).

Tomando como base este último trabajo se dividió la Península en tres regiones (figura 6.4), una zona norte tomando la costa cantábrica y la vertiente norte del Atlántico, una zona centro-sur que engloba el centro de la Península y Andalucía y una tercera que representa la cuenca mediterránea.

Como se dijo anteriormente, el análisis, tanto de la precipitación como de la nubosidad, se va a realizar: (6.1) en función de la posición que ocupan las DANAs en su primer día de ocurrencia y (6.2) en función de las regiones de precipitación.

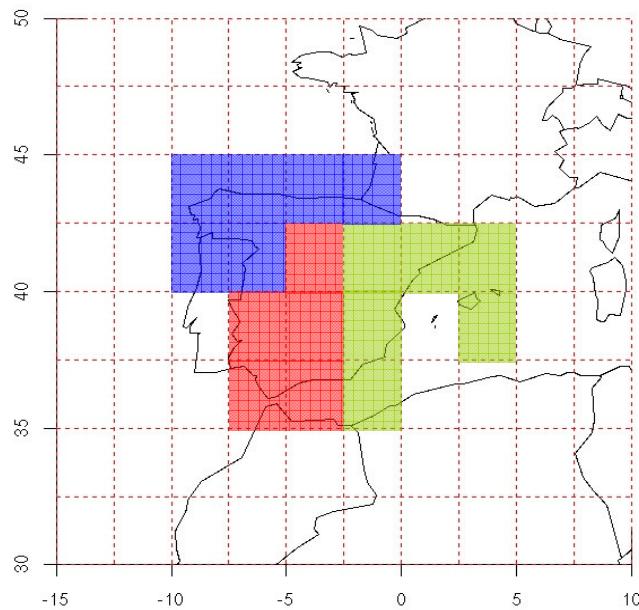


Figura 6.4: Regionalización de la Península Ibérica y Baleares tomando como base la división de Esteban-Parra (1998). En azul la región norte y cantábrica, en rojo la zona centro y Andalucía y en verde la zona este y mediterránea.

6.1 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN Y NUBOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS DANAs

Para realizar el estudio de la precipitación y la nubosidad asociada a los posiciones de las DANAs se divide la región de estudio en cuatro zonas, definiéndolas como región noroeste (NO), noreste (NE), suroeste (SO) y sureste (SE) –figura 6.5-. Para cada una de estas zonas se analiza la precipitación y la nubosidad que conllevan todas las DANAs que ocurren dentro de esos límites. El número de DANAs en cada sector para los datos de precipitación (periodo 1958-1998) es el siguiente: 28 DANAs para el noroeste, 13 para el noreste, 34 para el suroeste y 20 en el sureste. Para el periodo de datos que disponemos de nubosidad (1973-1998) el número de DANAs es: 17 DANAs para el noroeste, 7 para el noreste, 24 para el suroeste y 16 en el sureste.

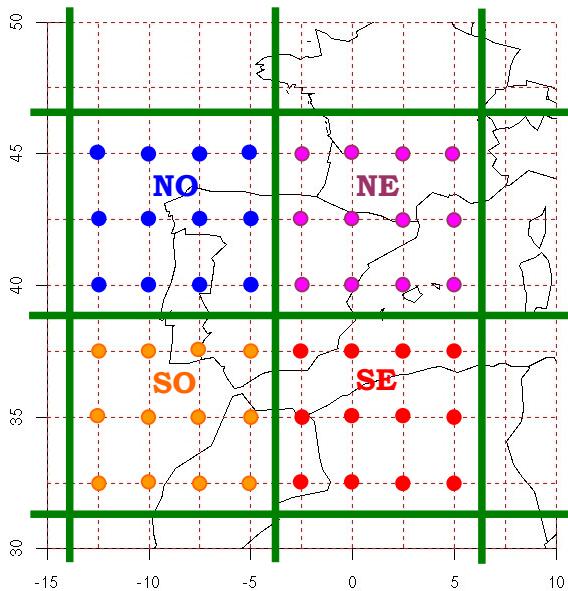


Figura 6.5: Zonas en las que se divide la región de la Península Ibérica y Baleares para evaluar la precipitación y nubosidad en función de la posición de las DANAs.

La precipitación media acumulada producida por las DANAs de cada sector se representa en la figura 6.6, y en la figura 6.7 se representa la precipitación relativa, es decir, se calcula el porcentaje de precipitación que aporta cada caja a la precipitación total de la Península cuando las DANAs ocurren en cada región analizada.

Se puede ver en la figura 6.6 que la precipitación máxima para las DANAs que ocurren en la región del noroeste se produce en la zona del País Vasco donde se recogen más de 85 l/m^2 , siendo también el máximo para todas las regiones en las que dividimos el territorio. Las DANAs del noreste dejan la precipitación más elevada en Cataluña (más de 30 l/m^2), pero la cantidad de precipitación recogida es mucho menor en comparación con el caso anterior. Para las registradas en el suroeste la máxima precipitación se recoge el este del estrecho de Gibraltar, al igual que para el conjunto de DANAs del sector sureste.

Esta distribución se ve más claramente en la figura 6.7 que representa los porcentajes de precipitación para cada sector. Para el caso del sector noroeste el 20% de la precipitación la recoge la caja del País Vasco, para el sector noreste la caja sobre Cataluña representa el 60% de la precipitación, para el sector sureste el máximo se encuentra, como se dijo antes, en la caja

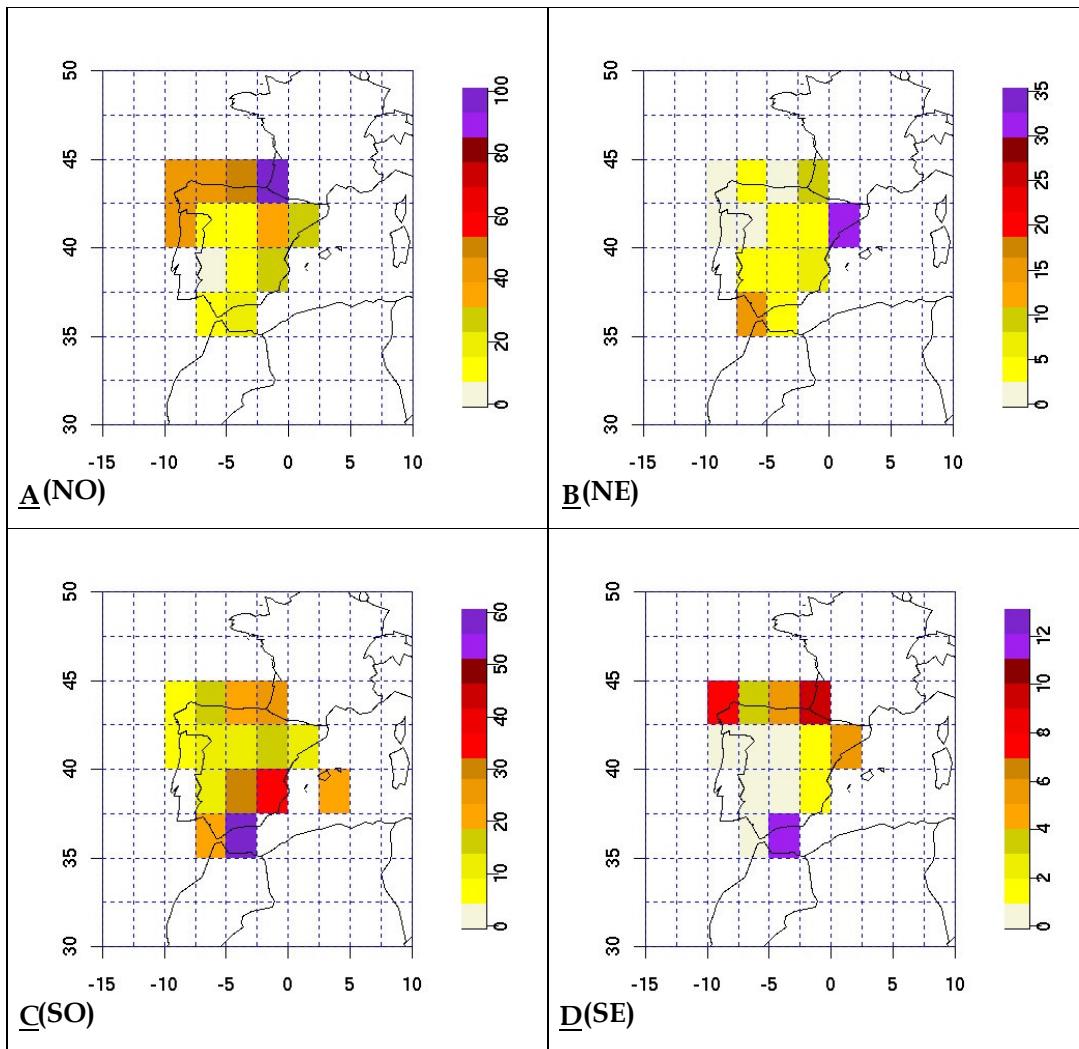


Figura 6.6: Precipitación media acumulada (en $1/m^2$) por las DANAs ocurridas en la región: A: noroeste, B: noreste, C: suroeste y D: sureste.

al este del estrecho de Gibraltar y representa el 30% del total de la precipitación, mientras que en el sector suroeste el máximo, también localizado sobre esta última caja, representa un 20%. Vemos así que mientras la máxima precipitación absoluta asociada a DANAs se produce en una caja del País Vasco para DANAs localizadas sobre el noroeste peninsular, la máxima precipitación en términos porcentuales se obtiene para aquellas DANAs localizadas en el sector noreste, y en una caja sobre Cataluña.

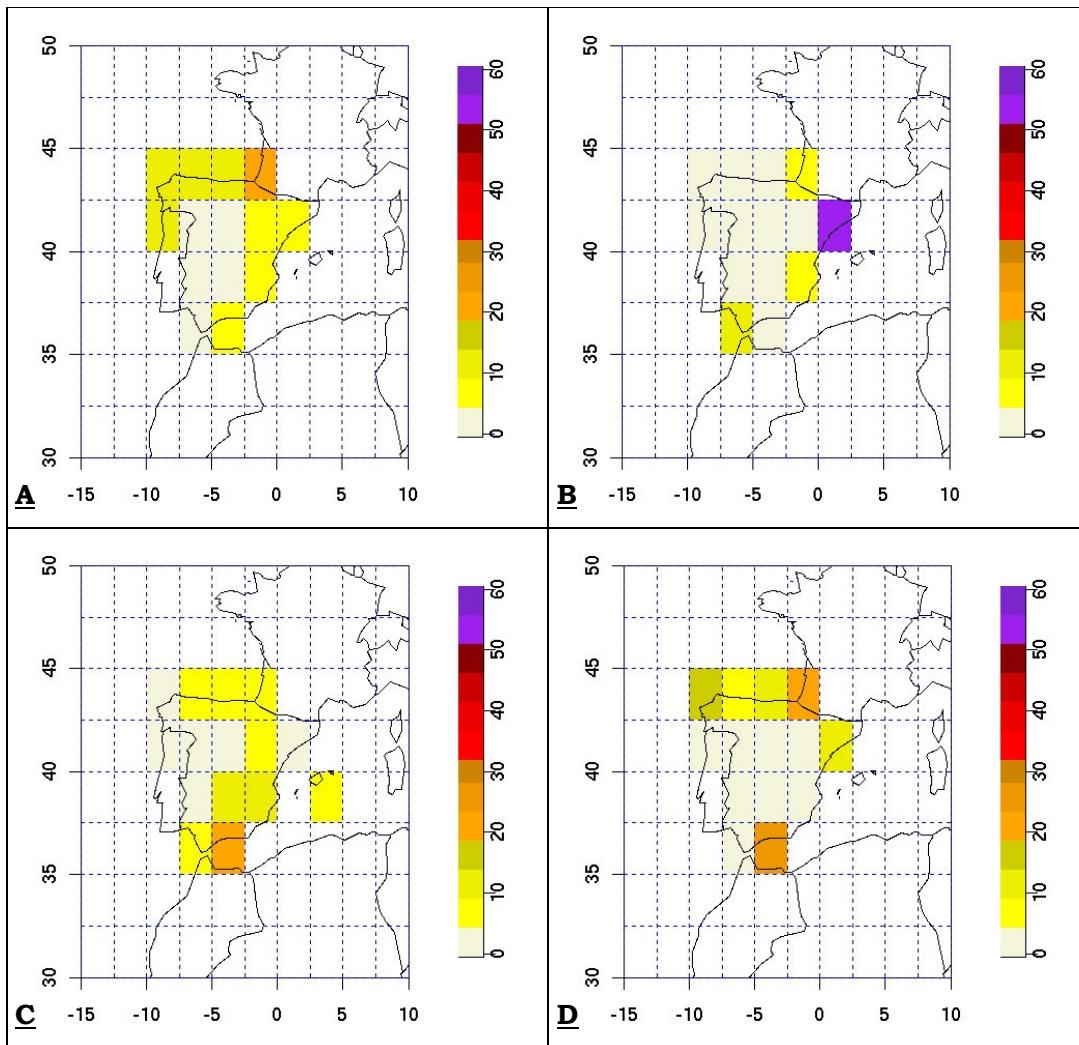


Figura 6.7: Precipitación relativa (en %) asociada a las DANAs ocurridas en la región: A: noroeste, B: noreste, C: suroeste y D: sureste.

En ambas gráficas se puede comprobar como la precipitación menor ocurre sobre el centro de la Península para los cuatro casos. También se puede ver como, en el caso de las DANAs localizadas en la región sureste, las precipitaciones, eliminado el máximo comentado anteriormente, se concentran en la cornisa cantábrica.

Debemos tener en cuenta en todo este estudio la limitación que supone el escaso número de estaciones y la falta total de datos de los países circundantes a España y sobre el mar. De este modo sólo podemos circunscribirnos a los efectos de las DANAs en el territorio español, perdiendo

así información de regiones características de precipitación y nubosidad. Así y todo, si se analiza cada una de las cuatro regiones definidas de ocurrencia de DANAs se puede concluir lo siguiente, atendiendo a la definición del modelo conceptual de DANAs, en cuanto a la precipitación:

1.- Para las DANAs ocurridas en el sector noroeste (NO): las precipitaciones se producen en la zona del escudo baroclinio que acompaña a la DANAs en su parte delantera, zona frontal delantera que coincide con la costa mediterránea y la zona más oriental del Cantábrico, y en el centro de la DANAs que puede ser debida a las células convectivas o también a que la baja se encuentre cerrada en superficie (recordemos que el 42% de los sistemas que analizamos para el sector Europeo se encontraban cerrados en superficie). En la gráfica siguiente (figura 6.8) se pueden ver ejemplos de DANAs que ocurren en esta zona del NO peninsular que dejan estos tipos de precipitación descritos. En las gráficas IV.1 del anexo para los días 8-3-1971, 21-1-1971, 25-5-1975, 5-11-1993 y 26-11-1998 se pueden ver otros ejemplos de DANAs en los que se refleja bien la precipitación asociada al escudo baroclinio; y para los días 6-7-1958, 14-7-1977, 13-7-1982, 27-7-1983 y 6-8-1997 se ve bien reflejada la ocasionada por el centro de la DANAs.

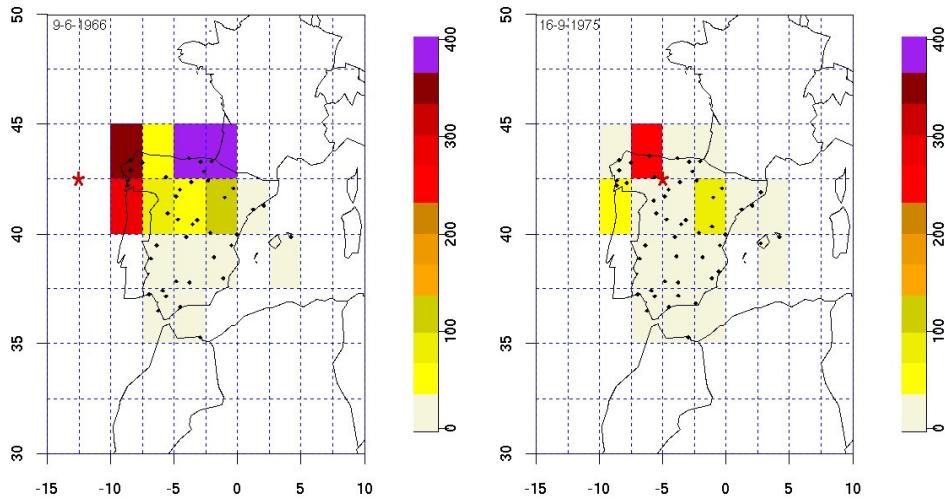
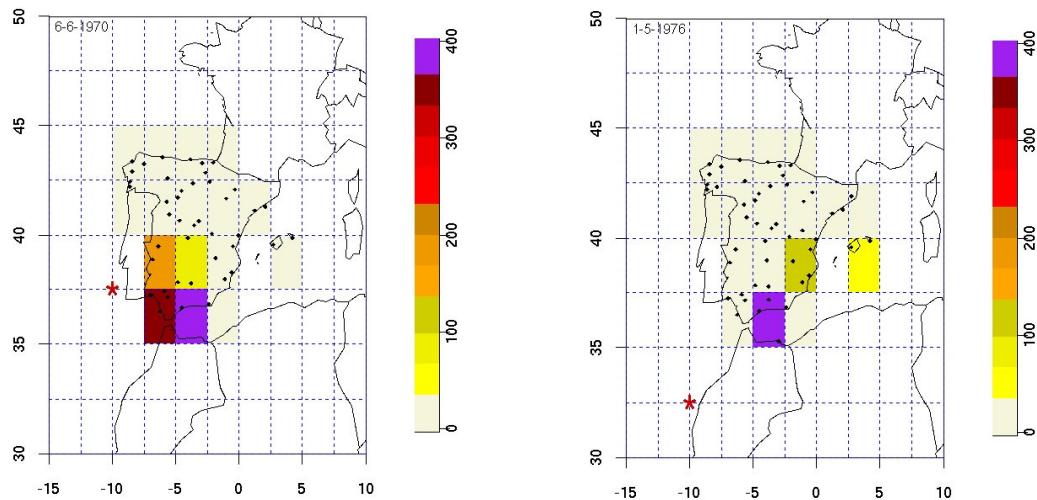


Figura 6.8: Precipitación media acumulada (l/m^2) para dos DANAs que suceden en la región noroeste. En la DANA del día 9-6-1966 se refleja la precipitación asociada al escudo baroclinio. En la DANA del 16-9-1975 se refleja la precipitación asociada al centro de la DANA.

2.- Para las DANAs del sector suroeste (SO): tenemos también precipitación asociada al escudo barocílico, aquélla que ocurre en la región desde el estrecho de Gibraltar hasta las Islas Baleares. También se produce precipitación importante en la parte norte de la Península que puede deberse a flujos del oeste de la circulación general, ya que los sistemas que estamos analizando en este caso se sitúan bastante al sur de la vertiente cantábrica y posiblemente la precipitación en esta región se deba a frentes que sean capaces de superar a las DANAs por su parte superior. En la figura 6.9 se ven dos ejemplos de DANAs que ocurren en esta región del suroeste y que dejan precipitaciones asociadas al escudo barocílico. En la figura 6.10 un ejemplo de la precipitación sobre la región cantábrica debida al flujo del oeste y en la figura 6.11 un caso para el cual la precipitación se debe a desarrollos en el centro de la DANA.



Figuras 6.9: Ejemplos de DANAs que ocurren en el suroeste que dejan precipitación (en $1/m^2$) asociada al escudo barocílico.

3.- Para las DANAs del sector noreste (NE): en este caso la precipitación mayor sobre Cataluña coincide con el centro de las DANAs, probablemente este tipo de precipitación sea de tipo convectivo. En la figura 6.12 se ve una DANA que refleja este tipo de precipitación (la DANA del 8-6-1962 de la figura IV.1 del anexo también es un buen ejemplo). La segunda zona en importancia de precipitación para este sector se encuentra sobre el Estrecho, ésta se debe a flujos del oeste de la propia DANA, sobre todo de aquéllas que han llegado a

cerrarse en superficie. Vemos en la figura 6.13 un ejemplo de este tipo de precipitación.

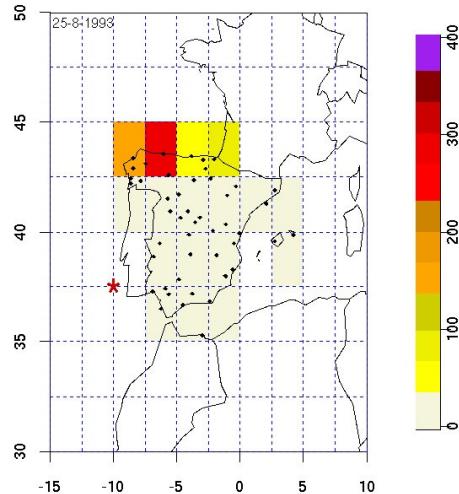


Figura 6.10: Ejemplo de DAN que ocurre en el suroeste aislada de la circulación general. La precipitación (en $1/\text{m}^2$) en la región cantábrica se debe a flujos del oeste.

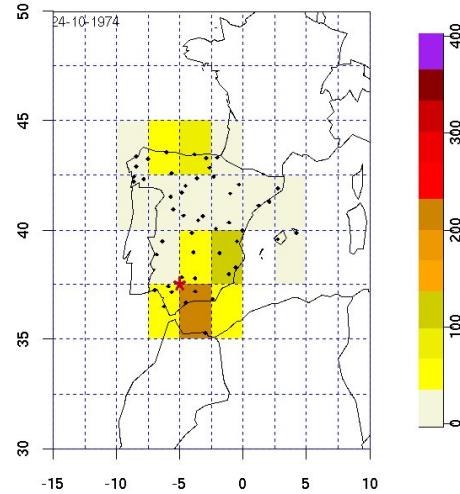


Figura 6.11: Ejemplo de DAN que ocurre en el suroeste en el que la precipitación (en $1/\text{m}^2$) en el sur de la DAN.

Pe

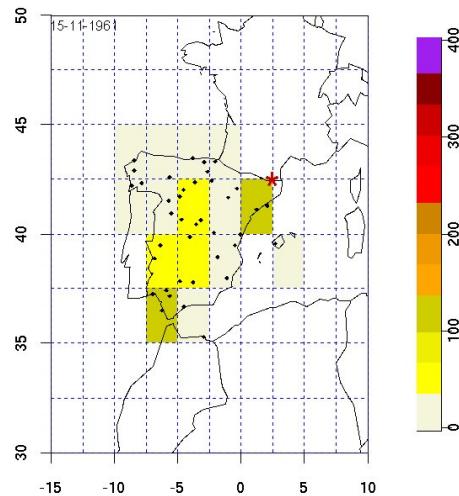


Figura 6.12: Ejemplo de precipitación asociada (en $1/\text{m}^2$) al centro de la DAN que ocurre en el noreste peninsular.

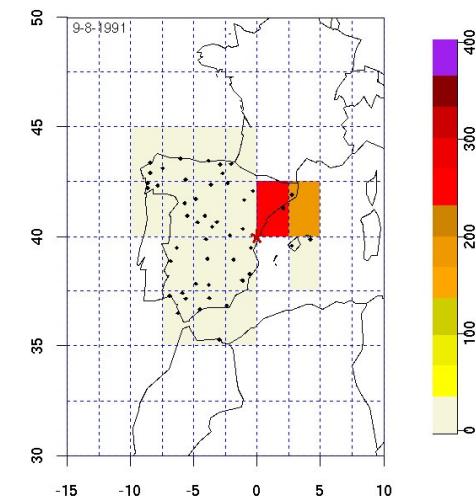


Figura 6.13: Ejemplo de precipitación asociada (en $1/\text{m}^2$) al flujo del oeste de la propia DAN para un sistema que sucede en el noreste de la Península. También se observa precipitación asociada al centro de la DAN.

4.- Para las DANAs del sector sureste (SE): en cuanto a la precipitación asociada a estas DANAs en la cuenca mediterránea se puede decir que se debe a la circulación del propio sistema, así en la zona de Cataluña se trata de flujos del este de la parte más al norte de la DANA y en la zona del Estrecho de flujos del oeste de aquellas DANAs que lograron cerrarse en superficie. La otra región en la que se detecta precipitación importante es en el tercio norte peninsular, que como ya comentamos en el caso de DANAs del sector suroeste, se deben a flujos del oeste de la circulación general que supera a las DANAs ya aisladas. Las figuras 6.14 y 6.15 muestran estos dos tipos de precipitación para DANAs situadas en esta región.

Además del campo de precipitación, se analiza la nubosidad media (medida en octas) asociada a las DANAs que ocurren en estas cuatro regiones. Para el caso de la nubosidad se utilizan datos de estaciones de la red principal del INM para el periodo desde 1973 hasta 1998.

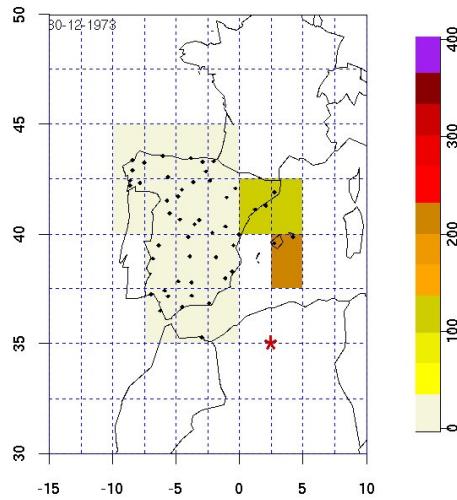


Figura 6.14: Ejemplo de precipitación asociada (l/m^2) al flujo del este creado por la propia DANA en su parte más norte.

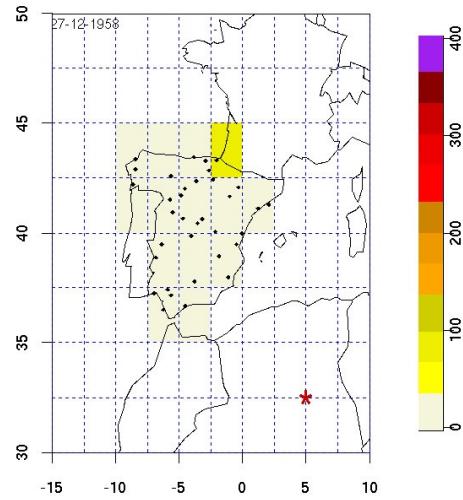


Figura 6.15: Ejemplo de precipitación asociada (l/m^2) a una DANA aislada en el sureste peninsular que se debe a flujos del oeste de la circulación general que supera a la DANA ya aislada.

En general se observa para las regiones NO y NE en la figura 6.16 que los máximos de capa nubosa media coinciden con el centro de las DANAs. Es en estos dos sectores donde mejor se puede analizar la nubosidad asociada a esta parte de las DANAs, ya que para los sectores SO y SE hay muy pocos sistemas que se encuentren sobre la Península y por lo tanto no se tienen suficientes datos.

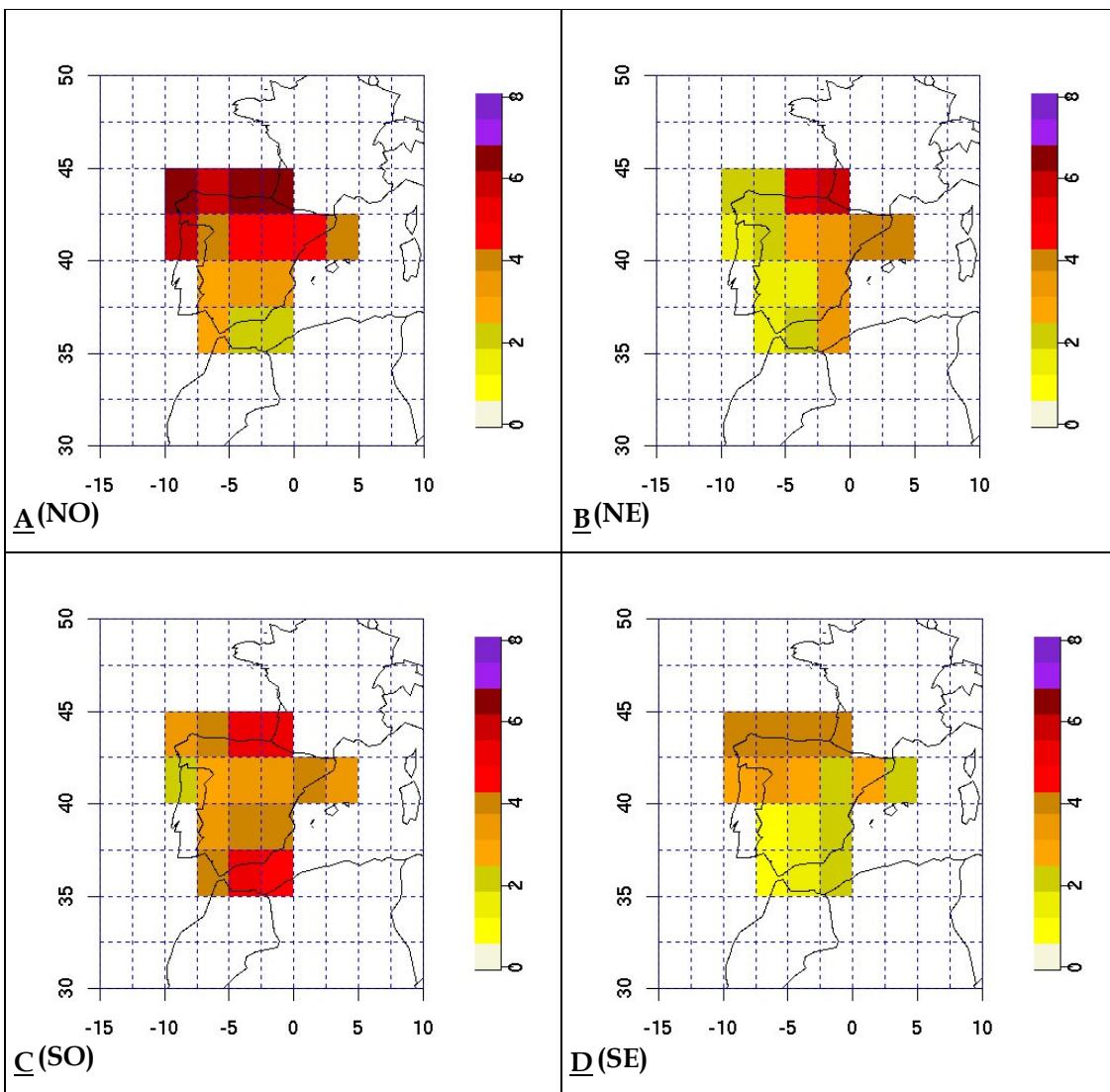


Figura 6.16: Nubosidad media (medida en octas) para las DANAs ocurridas en la región: A: noroeste, B: noreste, C: suroeste y D: sureste.

Atendiendo al modelo conceptual de DANAs se puede comprobar que:

1.- Para las DANAs del sector noroeste (NO): el máximo de nubosidad medio se detecta en la región cantábrica (más de 6 octas) y se debe a la nubosidad asociada al centro de las DANAs. La nubosidad que se encuentra más al este del centro de los sistemas se debe a la nubosidad asociada al escudo barocílico. En la figura 6.17 se representa la nubosidad asociada a una DANA situada en el sector NO (viene marcada con un asterisco en color negro).

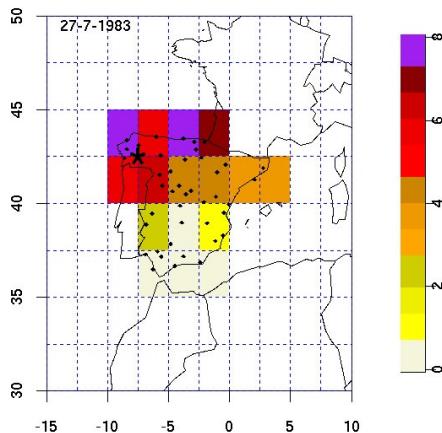


Figura 6.17: Nubosidad asociada (en octas) al centro y al escudo barocílico de una DANA situada en la región noroeste de la Península Ibérica.

En la figura 2 del anexo IV se muestra la nubosidad total asociada a cada DANA para el periodo de estudio desde 1973 hasta 1998. Se puede ver como las correspondientes a los días 25-5-1974, 10-9-1975, 11-9-1976, 11-7-1977, 14-7-1977, 18-6-1978, 21-7-1982, 20-6-1992, 6-8-1997, 26-1-1998 y el 2-7-1998 también cumplen las características antes citadas.

2.- Para las DANAs del sector suroeste (SO): hay muy pocos sistemas que en este caso se encuentren sobre la Península, por lo que es difícil detectar la nubosidad media asociada al centro de la DANA. Sin embargo sí se localiza la nubosidad asociada a la zona barocílica, máximo de nubosidad en la zona del Estrecho (más de 6 octas). El otro máximo situado en la vertiente cantábrica se debe a la nubosidad asociada a los frentes que superen las DANAs ya aisladas de la circulación general. En las figuras 6.18 y 6.19 se ven dos ejemplos de estas estructuras nubosas asociadas a las DANAs. En el anexo en la figura IV.2 para los días 11-2-1973, 11-6-1973, 24-10-1974 (se distingue

la nubosidad asociada al centro de la DANAs), 12-4-1975 (nubosidad en la región cantábrica), 9-4-1976, 12-5-1976, 25-5-1978, 30-4-1981 (centro de la DANAs) y 4-7-1982, entre otras, se observan patrones similares a los descritos.

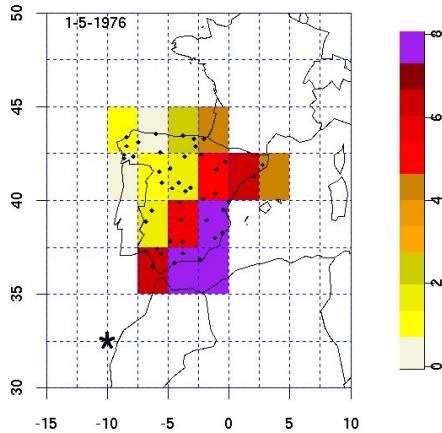


Figura 6.18: Nubosidad asociada (en octas) al escudo baroclinico (zona del Estrecho de Gibraltar) de una DANAs situada al suroeste de la Península.

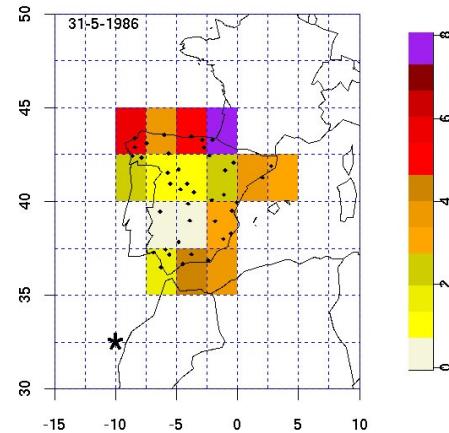


Figura 6.19: Nubosidad (en octas) en la vertiente cantábrica asociada al paso de un frente que supera a la DANAs aislada de la circulación situada al suroeste de la Península.

3.- Para las DANAs del sector noreste (NE): al igual que en el caso de las DANAs del sector NO, la cubierta nubosa media máxima se localiza bajo el centro de los sistemas. No se puede analizar la nubosidad asociada a la zona de desarrollo baroclinico por falta de datos de otros países, pero sí la que va ligada a la nubosidad que se forma en la parte trasera del centro de la DANAs. Así el máximo de nubosidad –zona este del Cantábrico (de 6 a 7 octas)- puede deberse tanto a la nubosidad de los sistemas que se encuentren sobre esa zona o a la nubosidad trasera de las DANAs situadas más al este del sector NE. En la figura 6.20 se distingue la nubosidad asociada a la parte trasera del centro de la DANAs y en la 6.21 aquélla ligada al centro del sistema.

4.- Para las DANAs del sector sureste (SE): el máximo de nubosidad medio se localiza en el tercio norte peninsular (3-4 octas). Se debe al paso de frentes asociados a flujos del oeste. En la figura 6.22 se representan dos DANAs características de este tipo. Se ve cómo los máximos de nubosidad se localizan al norte de la Península y cómo en la ocurrida el 21 de enero de 1994

sí hay señal de la nubosidad asociada al centro del sistema, ya que tenemos datos de la estación de Cabo de Gata en Almería.

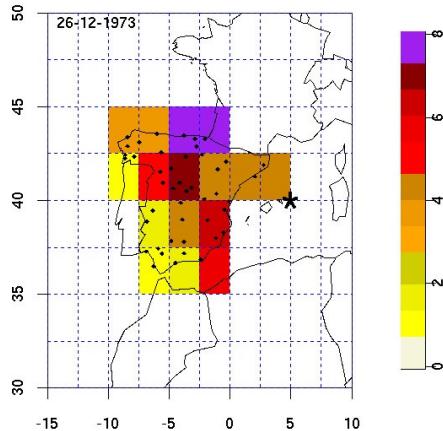


Figura 6.20: Ejemplo de DANA en la cual se distingue la nubosidad asociada (en octas) a la parte trasera del centro del sistema.

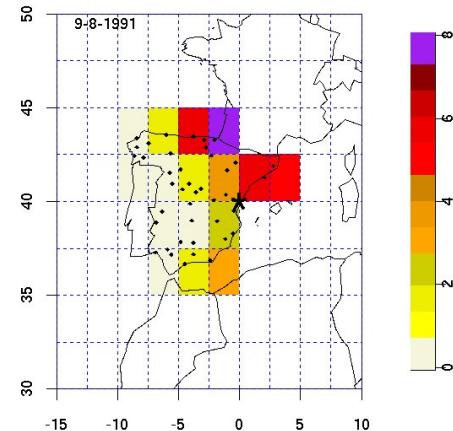


Figura 6.21: Ejemplo de DANA en la cual se distingue la nubosidad asociada (medida en octas) al centro del sistema.

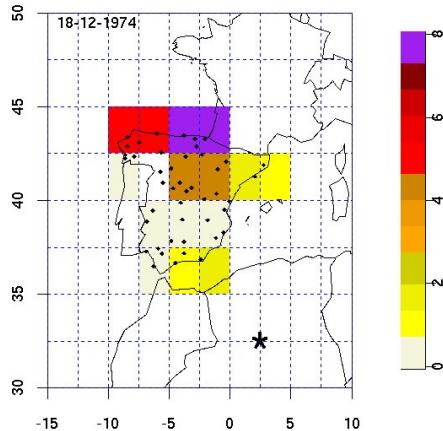
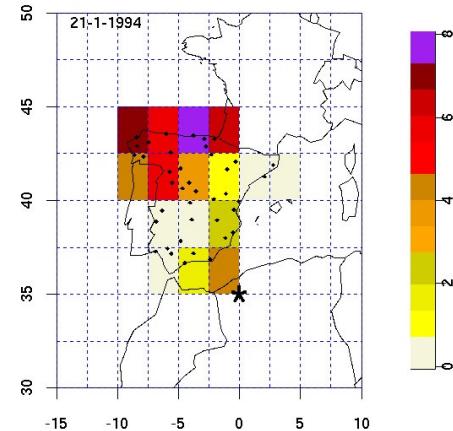


Figura 6.22: Nubosidad asociada (medida en octas) a las situaciones de DANA ocurridas en el sureste peninsular el 10 de diciembre de 1974 –izquierda– y el 21 de enero de 1994 –derecha–.



6.2 ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS REGIONES DE PRECIPITACIÓN

En esta parte del estudio se sigue un método diferente al utilizado hasta ahora. Ya se describió anteriormente como se han definido las regiones de precipitación principales en la Península Ibérica –norte, centro-sur y este-Mediterráneo (figura 6.4)-. Para cada DANA se calcula la precipitación media acumulada que deja en cada una de estas regiones principales de precipitación. Según la definición de la OMM, no se considera un evento lluvioso hasta que el registro no sea superior a 0.1 mm. Gallego (2004, 2005) clasifica la precipitación en el territorio peninsular, definiendo como lluvia ligera aquella que no supera los 2.5 l/m^2 . Así, si el valor medio de la precipitación acumulada para alguna de las regiones no supera el umbral de 2.5 l/m^2 se considera que esa DANA deja una precipitación despreciable en toda la Península Ibérica (a partir de ahora “precipitación nula o despreciable”). Si la precipitación media para alguna de las regiones es superior a 2.5 l/m^2 habrá que seguir los siguientes pasos para asignar a cada DANA una región de precipitación preferente:

- se calcula la precipitación media para cada una de las tres regiones (llamémoslas A, B y C)
- se elige la región con mayor valor medio (por ejemplo A), entonces a esa DANA se le asigna esa región
- pero si la media para alguna de las otras regiones (B y/o C) excede el 20% de la media de la región A se considera que esa DANA deja precipitación de tipo generalizada sobre toda la Península.

A partir de ahora se le asignará un código a cada región de precipitación, así cuando la precipitación sea nula o despreciable le corresponderá el código 1, para precipitación en la región norte será el 2, para la región centro-sur será el 3, para el este-Mediterráneo será el 4 y cuando la precipitación es de tipo generalizada en todo la Península se le denominará con el 5.

Para realizar el análisis se divide el trabajo en dos fases. Por una parte se analiza el tipo de precipitación que provocan las DANAs situadas en cada

cuadrante de los definidos en al apartado a) de este capítulo (figura 6.5) para cada región de precipitación. Por otra se analiza cuál es la distribución geográfica de las DANAs que provocan precipitación en las tres regiones de precipitación en las que se divide la Península, así como cuando tenemos precipitación nula y generalizada.

6.2.1 Tipo de precipitación en función de la situación de las DANAs

En la figura 6.23 se muestra la región de estudio dividida en cuatro cuadrantes, donde se representa para cada uno de ellos el correspondiente número de DANAs. En los recuadros en azul se representa el porcentaje de DANAs de cada sector que provocan precipitaciones de los distintos tipos que acabamos de describir. Se observa que en la mitad oeste es donde la densidad de sistemas es mayor, representando el 64.5% del total, perteneciendo el 36.56% al sector suroeste peninsular. El resto de los sectores -NO, SE y NE- representan el 27.96%, 21.5% y 13.98% respectivamente.

La mayor parte de las DANAs que ocurren en el sector NO dejan precipitación en la región norte (46.4%) o bien de tipo generalizada (32.1%). La precipitación ocurrida en la región norte es debida a la precipitación asociada a desarrollos en el centro de la DANA y la precipitación en la región mediterránea (7.2%) es debida a la zona frontal delantera de la DANA (escudo barocílico). En la región centro-sur de la Península la precipitación es nula; los flujos asociados a las DANAs que ocurren en la mitad noroeste no dejan efectos en la mitad sur.

La mayoría de las DANAs que ocurren en el sector NE de la Península provocan precipitaciones nulas o despreciables (46.1%). No obstante casi la cuarta parte de ellas (23.1%) se producen en la región Mediterránea, que probablemente sean de tipo convectivo, ya que se deben a precipitaciones asociadas al centro de las DANAs que ocurren en esta región. Sólo un 7.7% del total de estas DANAs ocasionan precipitaciones en la región norte; lo mismo ocurre en la región centro-sur; y un 15.4% de ellas producen precipitación de tipo generalizada.

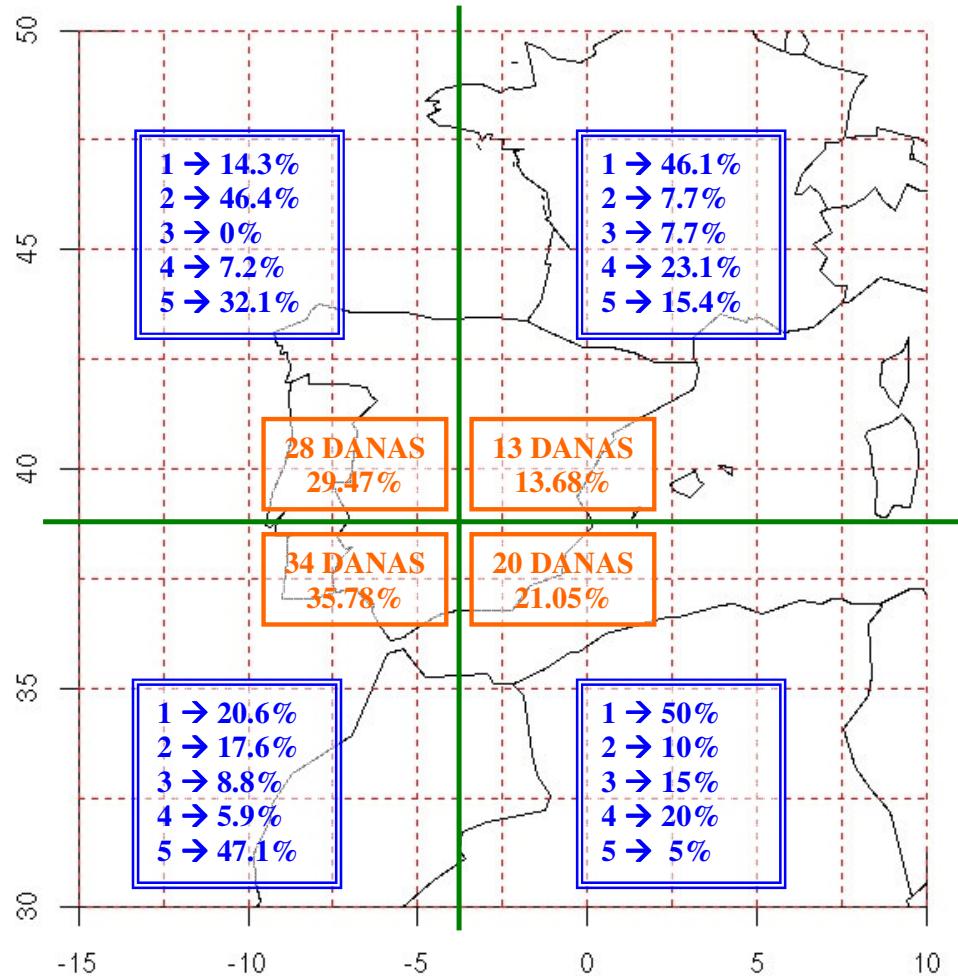


Figura 6.23: Esquema-resumen de los tipos de precipitación que provocan las DANAs en función de su posición. En los recuadros azules se observa el porcentaje de DANAs que producen precipitación en cada una de las regiones siguientes: región norte (representada por el número 2), región centro-sur (3), región este-Mediterráneo (4), para los tipos de precipitación nula o despreciable (1) y para la precipitación generalizada en toda la Península Ibérica y Baleares (5). En naranja el número de DANAs que ocurren en cada sector en los que se divide la zona de estudio, con el porcentaje que representan.

Las DANAs ocurridas en el sector SO de la Península provocan mayoritariamente precipitaciones generalizadas (47.1%) sobre la Península. En segundo lugar se producen precipitaciones nulas o despreciables (20.6%). En la región norte las precipitaciones (17.6%) son debidas a los frentes asociados al flujo general del oeste que supera a las DANAs aisladas de la circulación general situadas en el SO. El porcentaje de DANAs que provocan precipitación en las regiones mediterránea y centro-sur (8.8% y 5.9% respectivamente) se debe a la precipitación asociada al escudo baroclinio. Para las DANAs ocurridas en el sector SE de la Península la precipitación mayoritaria es de tipo nulo o despreciable, representando el 50% del total. Un 35% de las DANAs provocan precipitaciones tanto en la zona Mediterránea (15%) como en la centro-sur (20%), asociadas probablemente al propio flujo de la DANA, como se explicó en punto 4 del apartado (a) de este capítulo. En la región norte el porcentaje de DANAs que producen precipitación representa un 10% del total. Este tipo de precipitación es debida al paso de frentes asociados al flujo general del oeste.

6.2.2 Distribución geográfica de las DANAs según la zona en la cual provocan precipitación

En este punto se realiza un análisis atendiendo a la posición geográfica que ocupan las DANAs cuando la precipitación ocurre en alguno de los dominios de precipitación peninsular definidos en los apartados anteriores. Un resumen se puede ver en la tabla siguiente (tabla 6.1), en la que la posición se referencia simplemente con un cuadrante de la Península Ibérica.

	NO	SO	NE	SE
Nula o despreciable	14.8%	25.9%	22.2%	37.1%
Norte	59.1%	27.3%	4.5%	9.1%
Centro-Sur	0%	42.9%	14.2%	42.9%
Este-Mediterráneo	18.2%	18.2%	27.3%	36.3%
Generalizada	32.1%	57.1%	7.2%	3.6%

Tabla 6.1: Distribución de las DANAs según la región a la cual afecta la precipitación.

En las figuras 6.24-27 se amplía esta información, indicando sobre cada punto de rejilla el número de DANAs que tienen lugar y en qué estación del año se produjeron, así por ejemplo, en la figura 6.24 (que corresponde a precipitación despreciable) en las coordenadas 32.5°N y -12.5°W aparece la siguiente leyenda: PVVO, lo que quiere indicar que sobre ese punto, para todo el periodo analizado cuando las DANAs no provocan precipitación apreciable sobre la Península, ocurren cuatro DANAs, una en primavera (P), dos en verano (V) y otra en otoño (O).

- ❖ Las DANAs que no provocan precipitación importante sobre la Península (menor de 2.5 l/m²) se concentran en su mayoría en la región

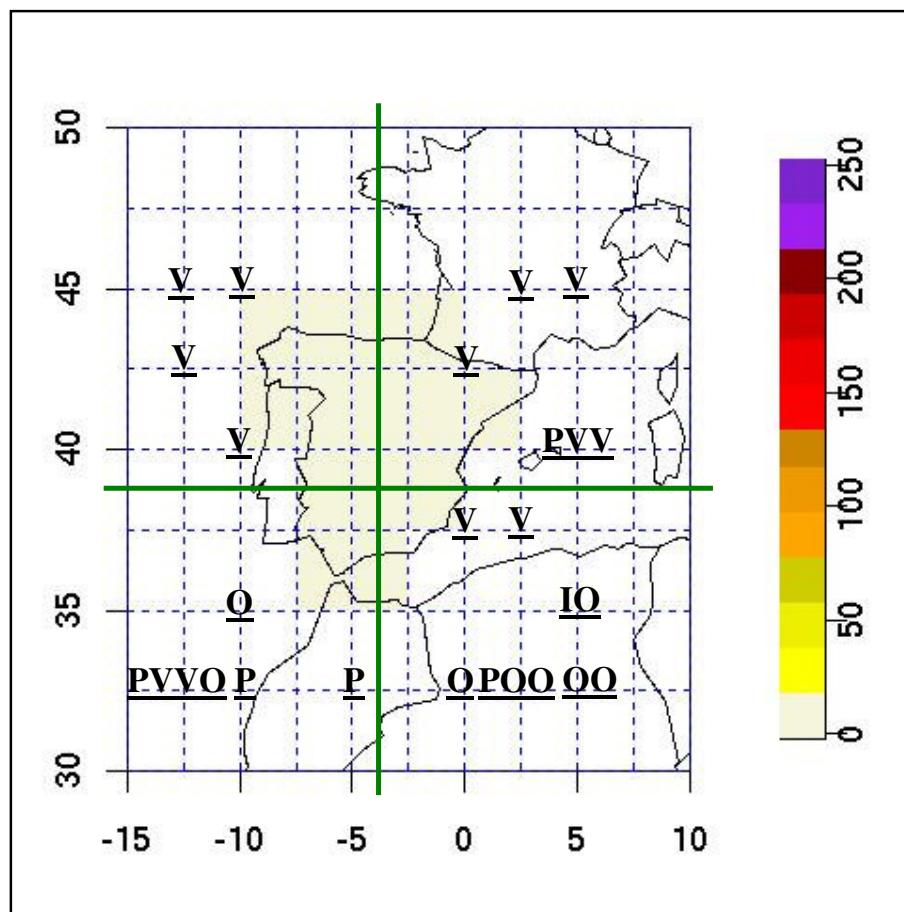


Figura 6.24: Distribución de las DANAs cuya precipitación es nula o despreciable sobre la Península Ibérica. La escala de colores representa la cantidad de precipitación en l/m². Cada DANAs está representada por la sigla de la estación del año en la que tiene lugar (I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño).

sureste (tabla 6.1), representando el 37.1% del total de las DANAs, seguida de la región suroeste que representa el 25.9%, la región sureste con el 22.2% y por último el noreste con el 14.8%. En cuanto a la estación del año la frecuencia de aparición de DANAs es mayor durante el verano (figura 6.25), que engloba el 48.2% del total de las DANAs para todos los sectores, durante el otoño suceden el 29.6% de los sistemas, en primavera el 18.5% y en invierno el 3.7%. Si se analizan los sectores por separado, en el NO el porcentaje de DANAs ocurridas en verano es del 100%, en el SO del 28.6%, en el NE del 83.3% y en el SE el 20%; siendo durante el invierno la estación del año en la cual ocurren menos casos de DANAs para cualquiera de los sectores.

❖ En el caso de las DANAs que dejan precipitación en el sector norte se observa que la mayor precipitación es consecuencia de las DANAs situadas en el sector noroeste, representando el 59.1% de los casos (tabla 6.1), y en segundo lugar las DANAs del sector suroeste, con un 27.3%. Se tiene pues que la precipitación del sector norte se debe mayoritariamente a situaciones de DANAS ocurridas en la mitad oeste peninsular (86.4% del total de casos para toda la Península). Esta precipitación es causada por el paso de frentes asociados a flujos del oeste que superan a las DANAs que se encuentran aisladas de la circulación general, cuando se habla de DANAs en el sector SO, y por precipitaciones asociadas al centro de las DANAs y al escudo baroclinico, en los casos de sistemas situados en el sector NO. La precipitación provocada por las DANAs del sector sureste representa el 9.1% y tan sólo el 4.5% de la precipitación en el norte se debe a DANAs del noreste, que probablemente se corresponda con la precipitación asociada a desarrollos en la parte trasera de la DANAs.

La observación más detallada que proporciona la figura 6.25 muestra que el verano es la estación con más número de casos, un 43.75%, ocurriendo la mayoría de las veces en la mitad oeste peninsular (el 85.7% de las veces que se produce una DANAs durante el verano lo hace en la mitad oeste). La estación de otoño es la estación menos favorecida para que se desarrollen DANAs que dejan precipitaciones en la región cantábrica (3.12%).

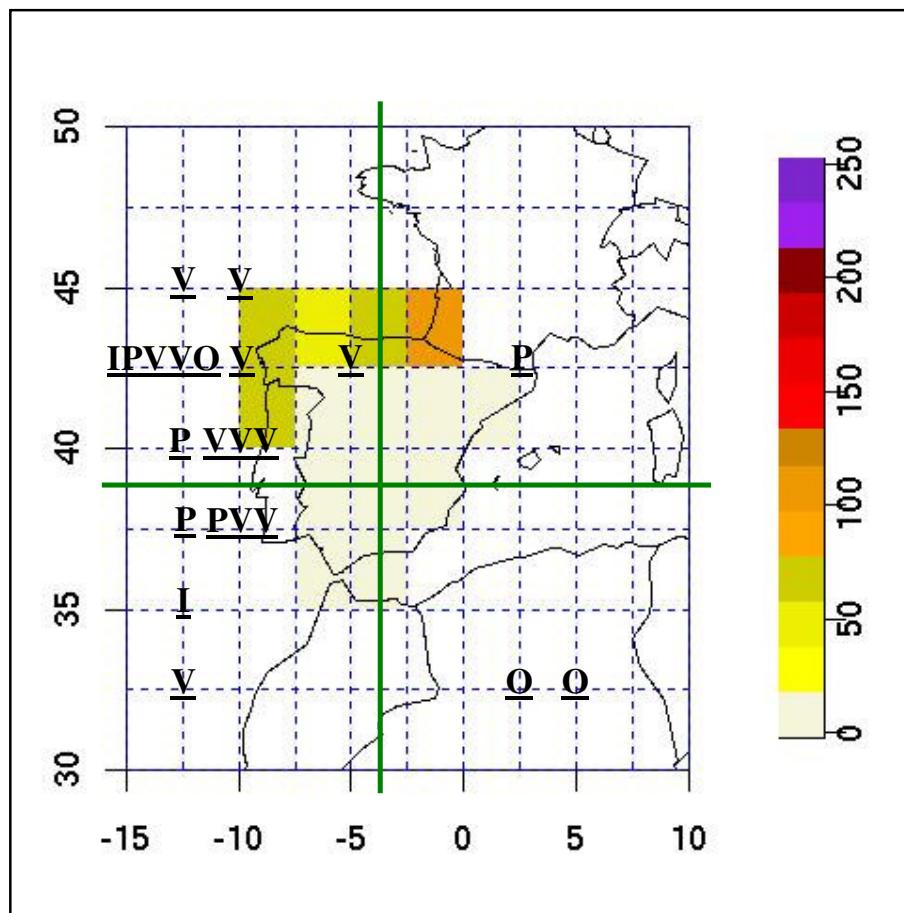


Figura 6.25: Distribución de las DANAs cuya precipitación se produce sobre la región norte de la Península Ibérica. La escala de colores representa la cantidad de precipitación en $1/m^2$. Cada DANAs está representada por la sigla de la estación del año en la que tiene lugar (I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño).

- ❖ El número de DANAs que provocan precipitación en la región centro-sur es muy reducido, como se puede ver en la figura 6.26. Se observa que la mayor parte de éstas ocurren en la mitad sur (85.8%) y suceden durante las estaciones de invierno o primavera (42.9% de los casos para cada una de ellas). Cabe destacar que prácticamente ninguna de las DANAs que suceden en la mitad norte provocan precipitación importante sobre la región centro-sur.

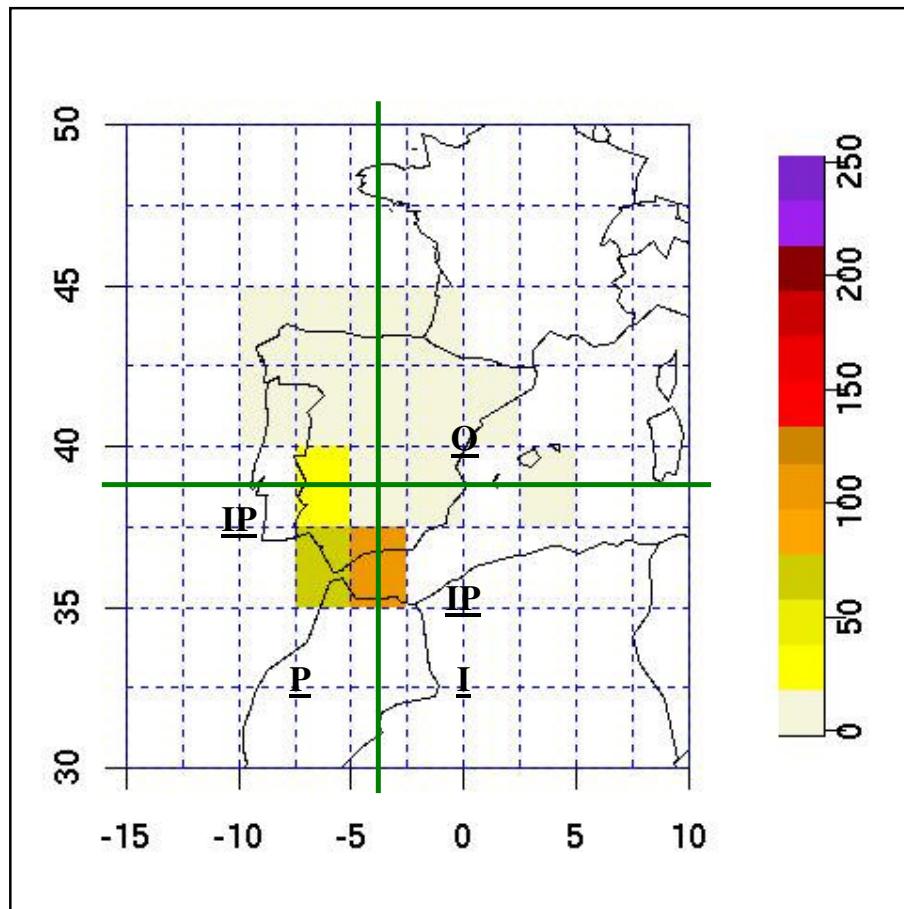


Figura 6.26: Distribución de las DANAs cuya precipitación se produce sobre la región centro-sur de la Península Ibérica. La escala de colores representa la cantidad de precipitación en $1/m^2$. Cada DANAs está representada por la sigla de la estación del año en la que tiene lugar (I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño).

❖ En cuanto a la precipitación en la región este-Mediterráneo, ésta es provocada mayoritariamente por las DANAs situadas en el sector sureste (36.3% de las veces –tabla 6.1–). Esta precipitación se debe a la circulación del propio sistema. En segundo lugar las DANAs del sector que más afectan a esta región son las que ocurren en el noreste (27.3%), seguido del sector noroeste y suroeste. En la figura 6.27 se observa que de nuevo la mayoría de las DANAs ocurren durante el verano (36.4%), siendo en este caso durante el invierno y el otoño cuando menos DANAs ocurren para todos los sectores.

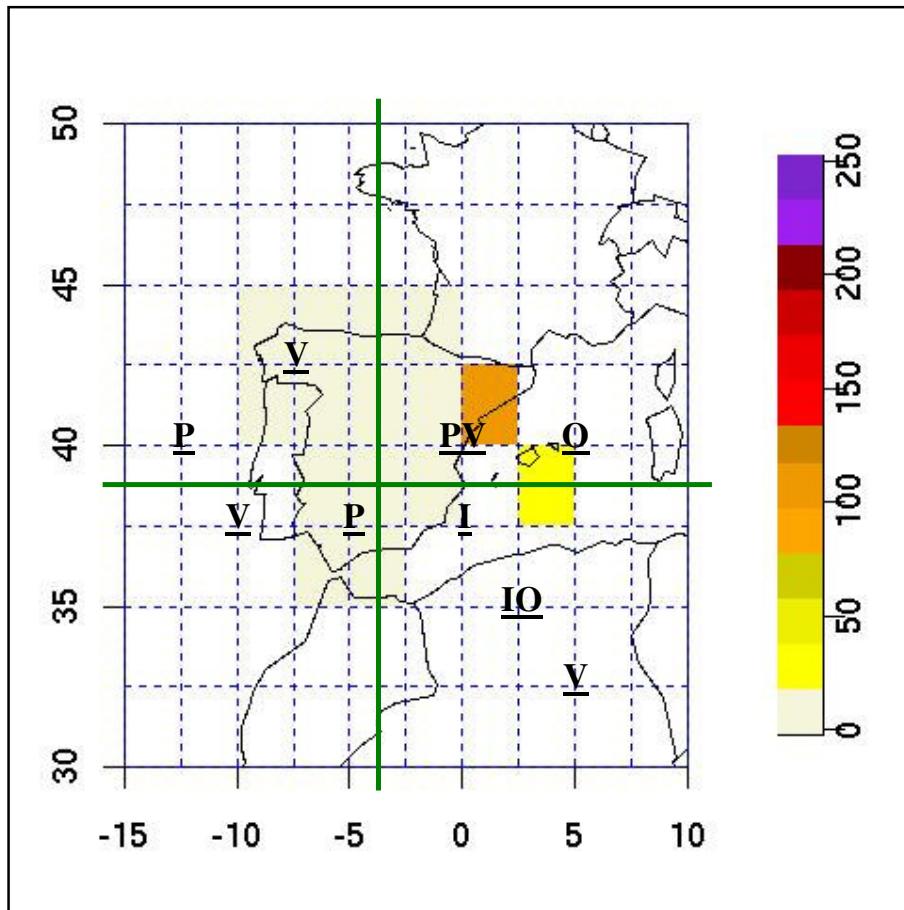


Figura 6.27: Distribución de las DANAs cuya precipitación se produce sobre la región este-Mediterráneo de la Península Ibérica. La escala de colores representa la cantidad de precipitación en l/m^2 . Cada DANAs está representada por la sigla de la estación del año en la que tiene lugar (I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño).

❖ Por último, cuando la precipitación se produce de modo generalizado en toda la Península Ibérica se observa -tabla 6.1- que mayoritariamente las DANAs ocurren en la mitad oeste peninsular, representando el 89.2%, siendo un 57.1% del total de las DANAs pertenecientes al sector suroeste y un 32.1% al sector noroeste; el sector noreste representa el 7.2% y el sector sureste el 3.6% de las DANAs. En la figura 6.28 puede verse la distribución geográfica de las DANAs que afectan a la Península cuando la precipitación que provocan es de tipo generalizado.

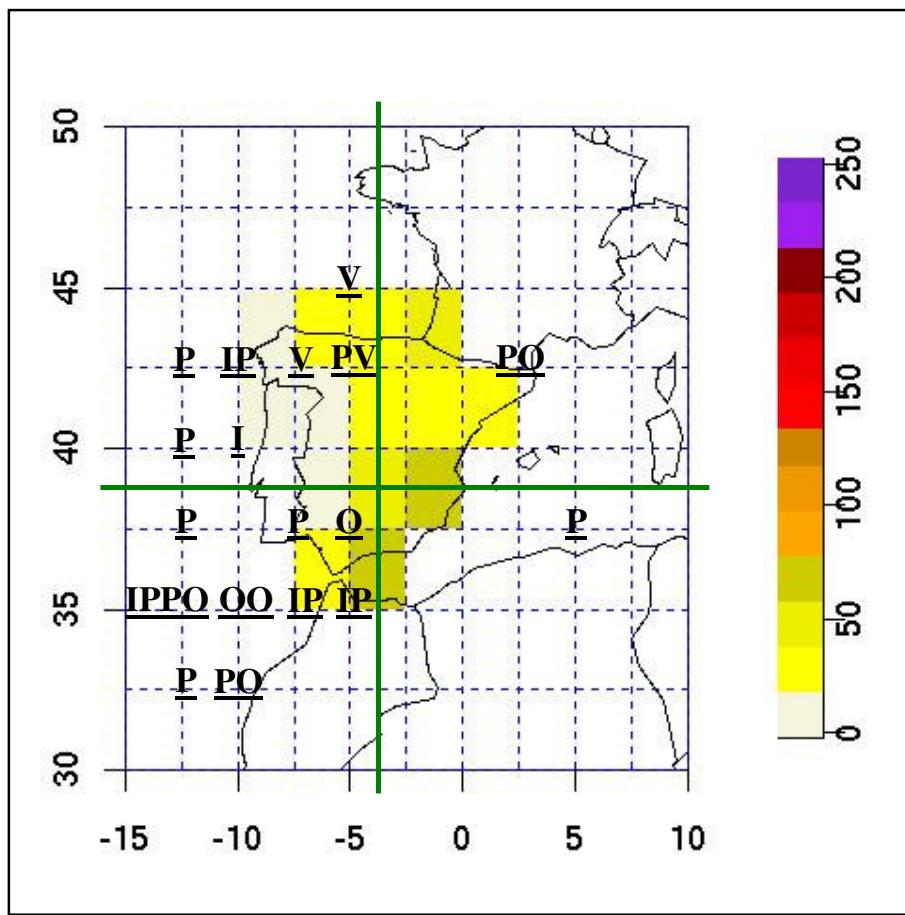


Figura 6.28: Distribución de las DANAs que provocan precipitación generalizada en la Península Ibérica. La escala de colores representa la cantidad de precipitación en $1/\text{m}^2$. Cada DANAs está representada por la sigla de la estación del año en la que tiene lugar (I: invierno, P: primavera, V: verano y O: otoño).

Al contrario de los demás tipos de precipitación, para los cuales la estación más frecuente de ocurrencia de DANAs era el verano, las DANAs que provocan precipitación generalizada ocurren mayoritariamente durante la primavera, representando la mitad del total de los casos, seguida del otoño (21.4%), el invierno (17.8%) y por último se encuentra el verano, con tan sólo un 10.8%. Si se analiza la ocurrencia de DANAs para cada sector de modo estacional se observa que durante el verano la ocurrencia de DANAs es prácticamente nula para el tipo de precipitación generalizada, sólo aparecen casos en el sector NO, representando el 33.3% de los sistemas en ese sector.

Capítulo 7:

Resumen, Conclusiones e

Investigación Futura

7 RESUMEN, CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

En este trabajo se realiza la primera climatología multidecadal (41 años) para el hemisferio Norte de sistemas de depresiones aisladas en niveles altos de la troposfera (DANAs). Las DANAs fueron identificadas utilizando datos de reanálisis NCAR-NCEP y mediante un método objetivo que se basa en la imposición consecutiva y restrictiva de cuatro de las características físicas del modelo conceptual de DANA (mínimo de geopotencial, circulación cerrada y aislada del flujo general, mínimo de espesor equivalente y mínimo de PFT en la alta troposfera). Este método de imposición de condiciones restrictivas minimiza la posibilidad de considerar como DANAs sistemas diferentes. Tras la obtención de la base de datos de DANAs se comprobó mediante otros métodos alternativos que los sistemas localizados se trataban realmente de DANAs. Estos métodos fueron: realización de una comparativa con períodos analizados previamente mediante métodos subjetivos, corroborar que los sistemas encontrados se hayan aislados de la circulación general de los oestes y que cumplen la condición de máximo de vorticidad potencial en el centro de la DANA. El método utilizado en este estudio está en concordancia con trabajos previos realizados de modo subjetivo en cuanto a la detección de estos sistemas en regiones extratropicales, aunque nuestro método objetivo subestima el número de DANAs, si se compara con los estudios anteriores en áreas cercanas al polo Norte o en regiones polares y sobreestima sistemas para las zonas subtropicales y tropicales. En cualquier caso, el acuerdo entre ambos métodos para las regiones de máxima ocurrencia de DANAs es satisfactorio. El hecho de que más del 98.5% de los sistemas localizados en la región europea se encuentren aislados de la circulación general de los oestes y que aproximadamente el 75% sean máximos de vorticidad potencial confirma la fiabilidad del método aplicado.

La base de datos que se obtiene es una buena herramienta para poder realizar un análisis exhaustivo en términos climatológicos de las DANAs -análisis de distribución espacial y temporal, duraciones y trayectorias más habituales-, así como poder estudiar los efectos sobre aquellas regiones a las que afectan las DANAs (siendo en este trabajo la Península Ibérica).

Los resultados alcanzados en este estudio revelan nuevas e interesantes propiedades de los sistemas aislados en niveles altos y nos permiten validar otras ya conocidas y poder extenderlas a un período de tiempo mayor.

1. Los resultados obtenidos del análisis de la distribución espacial de las DANAs para todo el hemisferio Norte indican la existencia de tres áreas preferentes su ocurrencia:

- el sur de Europa y la costa este del océano Atlántico, el noreste del océano Pacífico y el norte de China y las regiones de Siberia extendiéndose hasta la costa noroeste del Pacífico. De entre las tres regiones es el área europea la de mayor frecuencia de DANAs.

Estos resultados muestran que las DANAs ocurren preferentemente en las inmediaciones de las principales vaguadas del flujo circumpolar de larga escala.

2. Las DANAs se forman en mayor medida durante los meses de verano –aproximadamente el 50% de las DANAs identificadas ocurren durante los meses de julio, agosto y septiembre-, siendo el invierno la estación de menor ocurrencia. Durante el verano las DANAs se forman en latitudes más altas que en el resto del año en las tres áreas de mayor ocurrencia. Este resultado está relacionado con la intensidad y la posición del *jet* durante el verano, *jets* más débiles combinados con áreas continentales cálidas son los responsables del aumento del flujo meridional en estas regiones del hemisferio Norte y, por tanto, del incremento en la probabilidad de formación de DANAs.

3. Un análisis más exhaustivo de las tres áreas de mayor ocurrencia muestra:

a) una distribución bimodal en la región de Europa –se diferencian dos áreas de mayor frecuencia: la región este del océano Atlántico y la parte sur del continente, incluyendo la región mediterránea-,

- b) un desplazamiento de los sistemas hacia el océano durante el verano en la región americana y
- c) una expansión hacia el continente en la región asiática durante el verano.

Este comportamiento en las regiones americana y asiática durante los meses estivales está relacionado, de nuevo, con la intensidad y la posición del *jet*.

4. En cuanto a la duración de las DANAs se puede concluir que la mayoría tienen un tiempo de vida entre 2 y 3 días y muy pocas duran más allá de los 5 días. Aunque con limitaciones, se puede decir que las DANAs tienen duraciones mayores cuando ocurren a latitudes mayores.
5. En términos generales, la mayor parte de las DANAs se desplazan durante cualquier día de su ciclo de vida, siendo menos del 20% aquellas que se mantienen estacionarias. En la mayoría de los casos el movimiento más evidente es un desplazamiento hacia el norte o bien hacia el oeste, especialmente cuando se analizan las transiciones desde el segundo día de ocurrencia hacia el tercero y desde éste hasta el cuarto.
6. La Península Ibérica se encuentra dentro del área de mayor frecuencia en la ocurrencia de DANAs. Es por ello que en este trabajo se analizan también los efectos que provocan sobre nuestra región estos sistemas sinópticos. El análisis de la precipitación y nubosidad asociada a las DANAs sobre la Península Ibérica, las islas Baleares y Melilla pone de manifiesto:
 - A. Que no todas las DANAs conllevan precipitación intensa de tipo convectivo, como habitualmente se le asocia a sistemas históricamente denominados como “gotas frías”, o ‘cold pools’ en inglés, como se pone de manifiesto al analizar la precipitación individual de cada DANA.

- B. Que las precipitaciones sobre la zona mediterránea se debe principalmente a precipitación propia de las DANAs localizadas sobre esa región (más del 60%), y que por su cuantía sí son debidas, en este caso, a fenómenos convectivos producidos en el centro de las DANAs.
- C. Que la mayor parte de la precipitación asociada a DANAs procede del escudo barocílico, como se observa cuando se analizan los casos particulares de DANAs, sobre todo en los casos de DANAs localizadas en la mitad oeste peninsular.
- D. Que existen muchos casos en los que la precipitación detectada sobre la Península no se debe al propio sistema de DANA (un 12.5% de los sistemas), sino a los efectos que provoca la existencia de estos sistemas en la circulación general de los oestes. Es el caso de las DANAs que ocurren en la mitad sur peninsular, dando lugar a precipitaciones en el tercio norte ocasionadas por la entrada de frentes asociados al flujo general que supera a las DANAs ya aisladas en el sur.
- E. Que existe un gran número de sistemas que no provocan precipitación alguna (aproximadamente el 30%), localizándose su mayor parte en la mitad sur peninsular, y sobre todo durante el otoño.
- F. Que existe un porcentaje muy importante (un 30%) de DANAs que provocan precipitación generalizada en todo el territorio analizado –son las DANAs situadas sobre la mitad oeste peninsular (aproximadamente el 90%) las responsables de este tipo de precipitación–.

La base de datos de DANAs extraída en el trabajo de investigación que constituye esta tesis doctoral permitirá conocer propiedades de estos sistemas hasta el momento sólo investigadas muy parcialmente y por tanto ofrece nuevas oportunidades de investigación:

- Propiedades dinámicas: Las últimos estudios multidecadales de posición e intensidad del *jet* (Angell, 1998; Gallego et al, 2005) nos permiten construir una climatología de DANAs en relación con los sistemas de *jet stream*, investigando su energética (intercambios de energía entre el *jet* y las DANAs), e identificando problemas de estabilidad (cómo las DANAs se ven afectadas por la estabilidad o inestabilidad de los *jets*).
- Propiedades termodinámicas: El fácil acceso actual a bases de datos de radiosondeos como IGRA (Durre et al., 2005) o CARDs (Wallis, 1998) permite una caracterización muy precisa de las condiciones termodinámicas de diversos sistemas de tiempo en distintas condiciones para periodos de tiempo multidecadal. Así se ha realizado ya para anticiclones y borrascas sobre América del Norte (Bluestein y Banacos, 2002) y en el caso de las DANAs sería un instrumento muy útil para la mejora de su '*nowcasting*' (predicción a muy corto plazo), especialmente de fenómenos convectivos.
- Propiedades químicas: Ya se ha comentado que las DANAs son uno de los mecanismos más eficaces de intercambio troposfera-estratosfera (Stohl, 2003). Nuestra base de datos de DANAs permitirá estimar la magnitud global del intercambio de especies tan importantes como ozono, CFCs o contaminantes a través de estos sistemas y compararlo con la eficacia de otros modos de intercambio (Sprenger y Wernli, 2003). Asimismo también permitirá identificar mejor regiones preferentes de intercambio.

Capítulo 8:

Referencias

8. REFERENCIAS

- Ancellet, G., M. Beekmann y A. Papayannis, 1994: Impact of a cut-off lows development transport of ozone in the free troposphere. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 3451-3468.
- Angell, J.K., 1998: Contraction of the 300 mbar north circumpolar vortex during 1963-1997 and its movement into the eastern hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 25887-25893.
- Appenzeller, C., J.R. Holton y K.H. Rosenlof, 1996: Seasonal variation of mass transport across the tropopause. *Journal Geophysical Research*, **101**, 15071-15078.
- Appenzeller, C., Davies, H.C. y Norton W.A., 1996: Fragmentation of stratospheric intrusions. *Journal Geophysical Research*, **101**, 1435-1456.
- Bader, M.J., G.S. Forbes, J.R. Grant, R.B.E. Lilley y A.J. Waters, 1995: Images in weather forecasting - A practical guide for interpreting satellite and radar imagery. *Cambridge University Press*.
- Bamber, D.J., P.G.W. Healey, B.M.R. Jones, S.A. Penkett, A.F. Tuck y G. Vaughan, 1984: Vertical profiles of tropospheric gases: Chemical consequences of stratospheric intrusions. *Atmospheric Environment*, **18**, 1759-1766.
- Baray, J.L. , S. Baldy, R.D. Diab y J.P. Cammas, 2003: Dynamical study of a tropical cut-off low over South Africa and its impact on tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, **37**, 1475-1488.
- Barry, R.G. y R.J. Chorley, 2003: Atmosphere, Weather and Climate, 8th edn. Routledge, London/New York, pp. 32063.

Barsby, J. y R.D. Diab, 1995: Total ozone and synoptic weather relationships over southern Africa and surrounding oceans. *Journal Geophysical Research*, **100**, 3023-3032.

Bell, G.D. y L.F. Bosart , 1989: A 15-year Climatology of Northern Hemisphere 500 mb Closed Cyclone and Anticyclone Centers, *Monthly Weather Review*, **117**, 2142-2163.

Besse, J., A. Fournie, M. Renaudin, 1979: Météorologie, Tome 2. Aerologie-Météorologie Dynamique. Ecole Nationale de l'Aviation Civile, 1ère ed., France, 150 pp.

Bluestein, H.B., 1992: Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume I. Principle of Kinematics and Dynamics. Oxford University Press, 431 pp.

Bluestein, H.B., 1993: Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II. Observations and Theory of Weather Systems. Oxford University Press, 594 pp.

Bluestein, H.B. y P.C. Banacos, 2002: The vertical profile of wind and temperature in cyclones and anticyclones over the eastern two-thirds of the United States: A climatology. *Monthly Weather Review*, **130**, 477-506.

Borchi, F. y A. Marenco, 2002: Discrimination of air masses near the extratropical tropopause by multivariate analyses from MOZAIC data. *Atmospheric Environment*, **36**, 1123-1135.

Browning, K.A., 1985: Conceptual models of precipitation systems. *Meteorological Magazine*, **114**, 293 – 317.

Carlson, T.N., 1987: Cloud configuration in relation to relative isentropic motion; in: Satellite and radar imagery interpretation, preprints for a workshop on satellite and radar imagery interpretation - Meteorological Office College, Shinfield Park, Reading, Berkshire, England, 20 - 24 July 1987, p. 43 – 61.

Carlson, T.N., 1998: Mid-latitude Weather Systems. London, Harper Collins Academic, 507 p.

Conway B.J., L. Gerard, J. Labrousse, E. Liljas, S. Senesi, J. Sunde y V. Zwatz-Meise, 1996: COST78 Meteorology - Nowcasting, a survey of current knowledge, techniques and practice; Phase 1 report; Office for official publications of the European Communities.

Cuevas, E., Diamantino V. Henriques y J.M. Sancho, 2000: Stratosphere-Troposphere Exchange events over North Atlantic subtropical region. *Proceedings 2^a Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Lagos (Portugal), 8-12 febrero 2000, pp 451-452.

Cuevas, E. y J. Rodríguez, 2002: Statistics of cut-off lows over the North Atlantic. (en español) *3^a Asemblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Valencia 2002.

Danielsen, E.F., 1968: Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **25**, 502-518.

Davidson, N.E., G. Hills, H. Stern y T. Leggett, 2001: Forward-backward assimilation, prediction and dynamics of the southeast Australia floods of October 1993. *Australian Meteorological Magazine*, **50 (3)**, 205-224.

Degorska, M., 1980: A case study of an upper cut-off cyclone development. *Publ. Inst. Pol. Acad. Sci.*, **D11**, (141), 11-123.

Durre, I., R.S. Vose y D.B. Wuertz, 2004: An overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate* (submitted).

Ebel, A., H. Hass, H.J. Jakobs, M. Laule, M. Memmesheimer y A. Oberreuter, 1991: Simulation of ozone intrusion caused by tropopause fold and COL. *Atmospheric Environment*, **25A**, 2131-2144.

Esteban-Parra, M.J., F.S. Rodrigo y Y. Castro-Díez, 1998: Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology.*, **18**, 1557-1574.

Gallego, D., P. Ribera, R. García y L. Gimeno, 2005: A new look for the Southern Hemisphere jet stream. *Climate Dynamics* (in press).

Gallego, M.C., 2004: Un estudio de la variabilidad climática en la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Dpto. de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Extremadura, 328 pp.

Gallego, M.C., J.A. García y M.J. Vaquero, 2005: Distribución espacial de índices de frecuencia de precipitación diaria en la Península Ibérica. *Física de la Tierra* (en prensa).

Georgiev, C.G. y F. Martín, 2001: Use of potential vorticity fields, meteosat water vapour imagery and pseudo water vapour images for evaluating numerical model behaviour. *Meteorological Applications*, **8**, 57-69.

Gimeno, L., E. Hernández, A. Rúa y R. García, 1998: Surface ozone in Spain. *Chemosphere*, **38**, 3061-3074.

Gouget, H., G. Vaughan, A. Marenco y H.G.J. Smit, 2000: Decay of a cut off low and contribution to stratosphere-troposphere exchange. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **126**, 1117-1141.

Griffiths, M., M.J. Reeder, D.J. Low y R.A. Vincent, 1998: Observations of a cut-off low over southern Australia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **124**, (528), 1109-1132.

Hardman, M.E., 1983: Cold Pools. *Weather*, **38**, 152-153.

Hernández, A., 1999: Un Estudio Estadístico sobre Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAS) en el Sudoeste de Europa basado en Mapas Isentrópicos de Vorticidad Potencial. *IV Simposio Nacional de Predicción, Instituto Nacional de Meteorología*, Madrid. Centro de Publicaciones,

Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente (Serie Monografías), pp. 235-240.

Hernández, E., L. Cana, J. Díaz, R. García y L. Gimeno, 1998: Mesoscale convective complexes over the Western Mediterranean area during 1990-1994. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **68**, 1-12.

Hill, E.F. y K.A. Browning, 1987: Case study of persistent mesoscale cold pool. *Meteorological Magazine*, **116**, 297-309.

Holton J., P. Haynes, M. McIntyre, A. Douglass, R. Rood y L. Pfister, 1995: Stratosphere Troposphere exchange. *Review of Geophysics*, **33**, 403-439.

Hoskins, B.J., M.E. McIntyre y A.W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **111**, 877-946, [ver, corrigendum, etc., 113, 402-404, 1987].

Jansá, J.M., 1964: Meteorología del Mediterráneo Occidental. *Publicación Serie A.*, Servicio Meteorológico Nacional, Madrid, nº.**34**, 21 pp.

Jansá, A., 2004: ¿Qué es la gota fría?. *Ambienta*. nº. **36**, 59-62.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne y D. Jodeph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, No 3, 437-471.

Kentarchos, A. y T.D. Davies, 1998: A climatology of cut-off lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990-1994. *International Journal of Climatology*, **18**, 379-390.

Kentarchos, A., G.J. Roelofs, J. Lelieveld y E. Cuevas, 2000: On the origin of elevated surface ozone concentrations at Izaña Observatory during the

- last days of March 1996: a model study. *Geophysical Research Letters*, Vol **27**, 22, 3699-3702.
- Keyser, D. y M.A. Shapiro, 1986: A review of the structure and dynamics of upper level frontal zones. *Monthly Weather Review*, **114**, 452-499.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, J-K. Park y Y.S.I. Moon, 2002: The stratosphere-troposphere exchange of ozone aerosols over Korea. *Atmospheric Environment*, **36**, 449-463.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woolen, M. chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne y M. Fiorino, 2001: The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**, 247-268.
- Köpen, W., 1886: Die Bewegung der barometrischen Minima in den Tagen von 20 bis 24 Januar 1886 über Europa. *Meteorologische Zeitschrift*, **3**, 505.
- Langford, A., C. Masters, M. Proffitt, E. Hsie y A. Tuck, 1996: Ozone measurements in a tropopause fold associated with a cut-off low system. *Geophysical Research Letters*, **23**, 2501-2504 (and correction in *Geophysical Research Letters* , 24, 109-110.
- Llasat, M.C., 1987: Gotas de aire frío. Génesis, evolución y mecanismos. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona, 250pp.
- Llasat, M.C., 1991: Gota fría. Editorial Boixareu Universitaria, 165pp.
- Llasat, M.C. y M. Puigcerver, 1990: Cold air pools over Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **42**, 171-177.
- Malberg, H., 1985: Kaltlufttropfen. *Meteolorogie und Klimatologie*. Springer (Berlin), 119-123.

- Marín León, F., 2003: Las gotas frías / DANAs, ideas y conceptos básicos. Nota técnica del Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (STAP), nº **38**, 14 pp.. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Martín-Vide, J., 2004: Spatial distribution of daily precipitation concentration index in Peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, **24**, 95-971.
- Matsumoto, S. y K. Ninomiya, 1967: On the mesoescala warm core above the condensation level related to convective activities under the influence of a dome shaped cold air. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **45**, 306-314.
- Matsumoto, S.K., K. Ninomiya, R. Hasegawa y Y. Miki, 1982: The structure and role of a subsynoptic cold vortex on the heavy precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **60**, 339-353.
- Morgan, M.C. y J.W. Nielsen-Gammon, 1998: Using tropopause maps to diagnose midlatitude weather systems. *Monthly Weather Review*, **126**, 2555-2579.
- Muñoz-Díaz, D. y F.S. Rodrigo, 2004a: Impacts of North Atlantic Oscillation on the probability of dry and wet winters in Spain. *Climate Research*, **27**, 33-43.
- Muñoz-Díaz, D. y F.S. Rodrigo, 2004b: Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912-2000) using cluster and principal component analysis: comparison. *Annales Geophysicae*, **22**, 1435-1448.
- Newton C.W. y E.O. Holopainen (eds.). Extratropical Cyclones. The Erik Palmen Memorial Volume, American Meteorological Society, Boston, 1990.

Nielsen-Gammon, J.W., 2001: A visualization of the Global Dynamic tropopause. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**, 6, 1151-1167.

Novak M.J., M. Lance, F. Bosart y D. Keyser, 2002: Climatology of warm season 500 hPa cut-off cyclones and a case study diagnosis of 14-17 July 2000. *19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, San Antonio, TX, 12-16 August 2002.

Oltmans, S., H. Levy II, J.M. Harris, J.T. Merrill, J.L. Moody, J. Lathrop, E. Cuevas, M. Trainer, M.S. O'Neill, J.M. Prospero, H. Vömel y B.J. Johnson, 1996: Summer and Spring Ozone Profiles Over the North Atlantic from Ozononesonde Measurements. *Journal of Geophysical Research*, **101**, D22, 29179-29200.

Palmen, E., 1949: On the origin and structure of the hight-level cyclones south of the maximun westerlies. *Tellus*, **1**, 22-31.

Palmen, E. y C. Newton, 1969: Atmospheric Circulation Systems, *Academic Press*, New York.

Parker, S.S., J.T. Hawes, S.J. Colucci y B.P. Hayden, 1989: Climatology of 500mb Cyclones and Anticyclones 1950-85. *Monthly Weather Review*, **117**, 558-570.

Petersen, S., 1936: Contribution to the theory of frontogenesis. *Geophysical Publications*, **11 (6)**, 1-27.

Porcu, F., C. Caracciolo y F. Prodi, 2003: Cloud systems leading to flood events in Europr: an overview and classification. *Meteorological Applications*, **10**, 217-227.

Price, J.D. y G. Vaughan, 1992: Statistical studies of cut-off low systems. *Annales Geophysicae*, **10**, 96-102.

- Price, J.D. y G. Vaughan, 1993: The potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off-lo systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **119**, 343-365.
- Qi, L., L.M. Leslie y S.X. Zhao, 1999: Cut-off low pressure systems over southern Australia: climatology and case study. *International Journal of Climatology*, **19**, 1633-1649.
- Ravetta, F. y G. Ancellet, 2000: Identification of dynamical processes at the tropopause during the decay of a cut-off low using high resolution airbone lidar ozone measurements. *Monthly Weather Review*, **128**, 3252-3267.
- Ribera, P. y M.E. Mann, 2002: Interannual variability in the NCEP Reanálisis 1948– 1999. *Geophysical Research Letters*, **29**, 132-1–132-4.
- Rodriguez-Puebla, C., A.H. Encinas, S. Nieto y J. Garmendia, 1998: Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, **18**, 299-316.
- Scherhag, R., 1937: Ein grenzfall atmospärischer Steuerung: Die Bodenisobaren ein Höhentief. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, **65**, 27.
- Scherhag, R., 1939: Der Kälteeinbruch Mitte Dezember 1938. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, **67**, 142.
- Scherhag, R., 1948: Neue Methoden der Wetteranalysen und Wetterprognose. Springer (Berlín), 227-235.
- Serrano, A., J.A. García, V.L. Mateos, M.L. Cancillo y J. Garrido, 1999: Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*, **12**, 2894-2919.
- Shapiro, M.A. , T. Hempel y A.J. Krueger, 1986: The Artic tropopause fold. *Monthly Weather Review*, **115**, 444-454.

- Smith, B.A., L.F. Bosart, D. Keyser y D. St.Jean, 2002: A global 500 hPa cutoff cyclone climatology: 1953-1999. *19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, San Antonio, TX, 12-16 August 2002.
- Sprenger, M. y H. Wernli, 2003: A northern hemispheric climatology of cross-tropopause exchange for the ERA15 time period (1979-1993). *Journal of Geophysical Research*, **108**(D12), 8521, doi:10.1029/2002JD002636.
- Stohl, A., 2003: Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO, *Journal of Geophysical Research*, **108**(D12), 8516, doi:10.1029/2002JD002490.
- Trigo, I.F., T.D. Davies y G.R. Bigg, 1999: Objective climatology of cyclones in the Mediterranean Region. *Journal of Climate*, **12**, 1685-1696.
- Trigo, I.F., G.R. Bigg y T.D. Davies, 2002: Climatology of cyclones mechanism in the Mediterranean. *Monthly Weather Review*, **130**, 549-569.
- Vaughan, G. y J.D. Price, 1989: Ozone transport into the troposphere in a cut-off-low event. *Ozone In The Free Atmosphere*, A Deepak, Virginia, USA, 415-418.
- Wallis, T.W.R., 1998: A subset of core stations from the Comprehensive Aerological Reference Dataset (CARDS). *Journal of Climate*, **11**, 272-282.
- Winkler, R. et al., 2001: Manual of Synoptic Satellite Meteorology. Conceptual Models. Version 3.0. (Available at Central Institute for Meteorology and Geodynamics Hohe Warte 38, 1190 Vienna, Austria).
- Wirth, V., 1995: Diabatic heating in an axisymmetric cut-off cyclone and related stratosphere-troposphere exchange. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **121**, 127-147.

Capítulo 9:

Anexos

Anexo I:
Figuras del capítulo 1

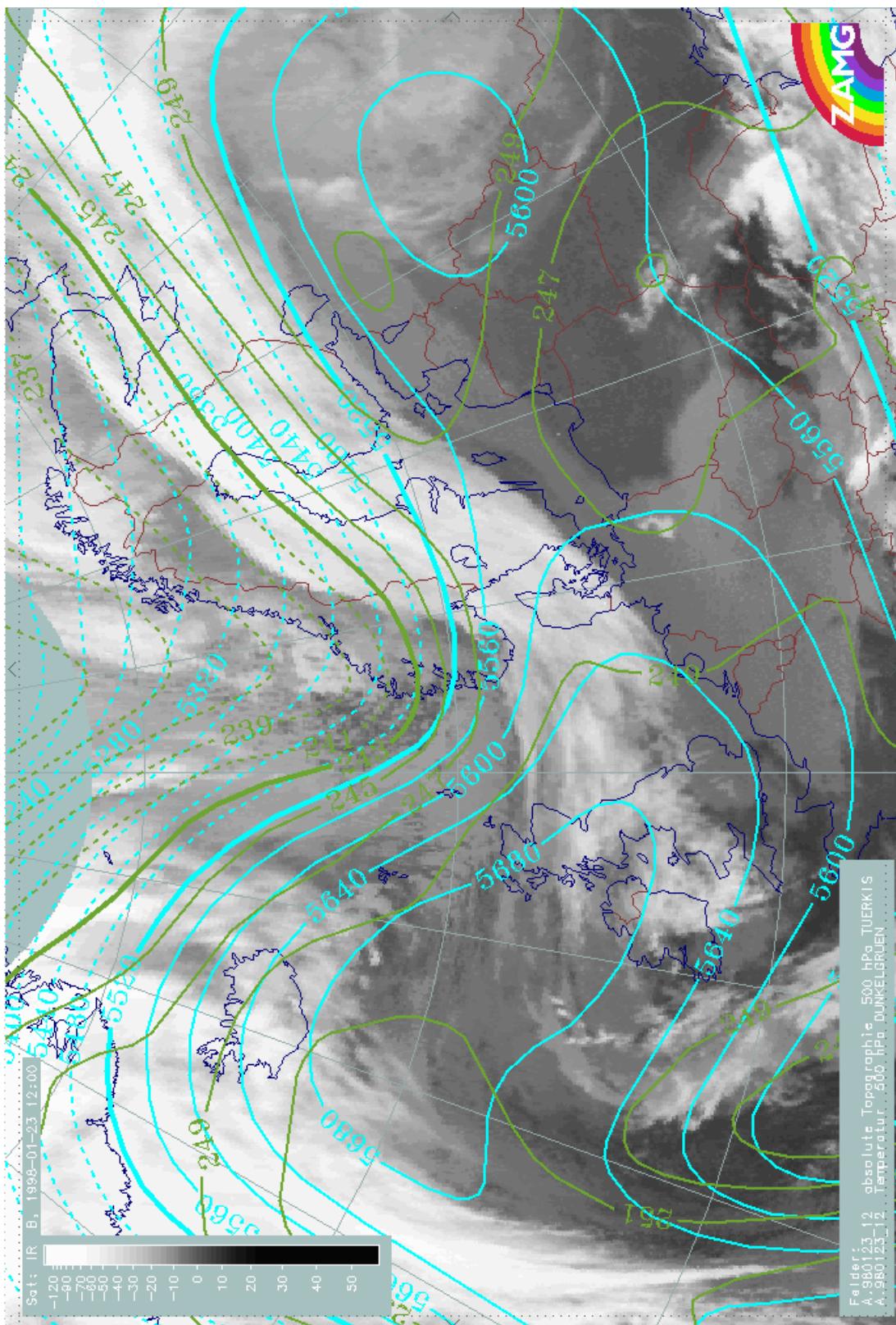


Imagen I.1(a,b,c): Imágenes del satélite Meteosat del canal infrarrojo (IR) de las tres fases de desarrollo de una DANA; las líneas azules representan la altura geopotencial y las verdes la temperatura, ambas al nivel de 500 hPa. Cortesía del ZAMG.

Imagen I.1.a:Fase de desarrollo de la vanguardia en altura - 23 enero 1998/12.00 UTC – (cont.)

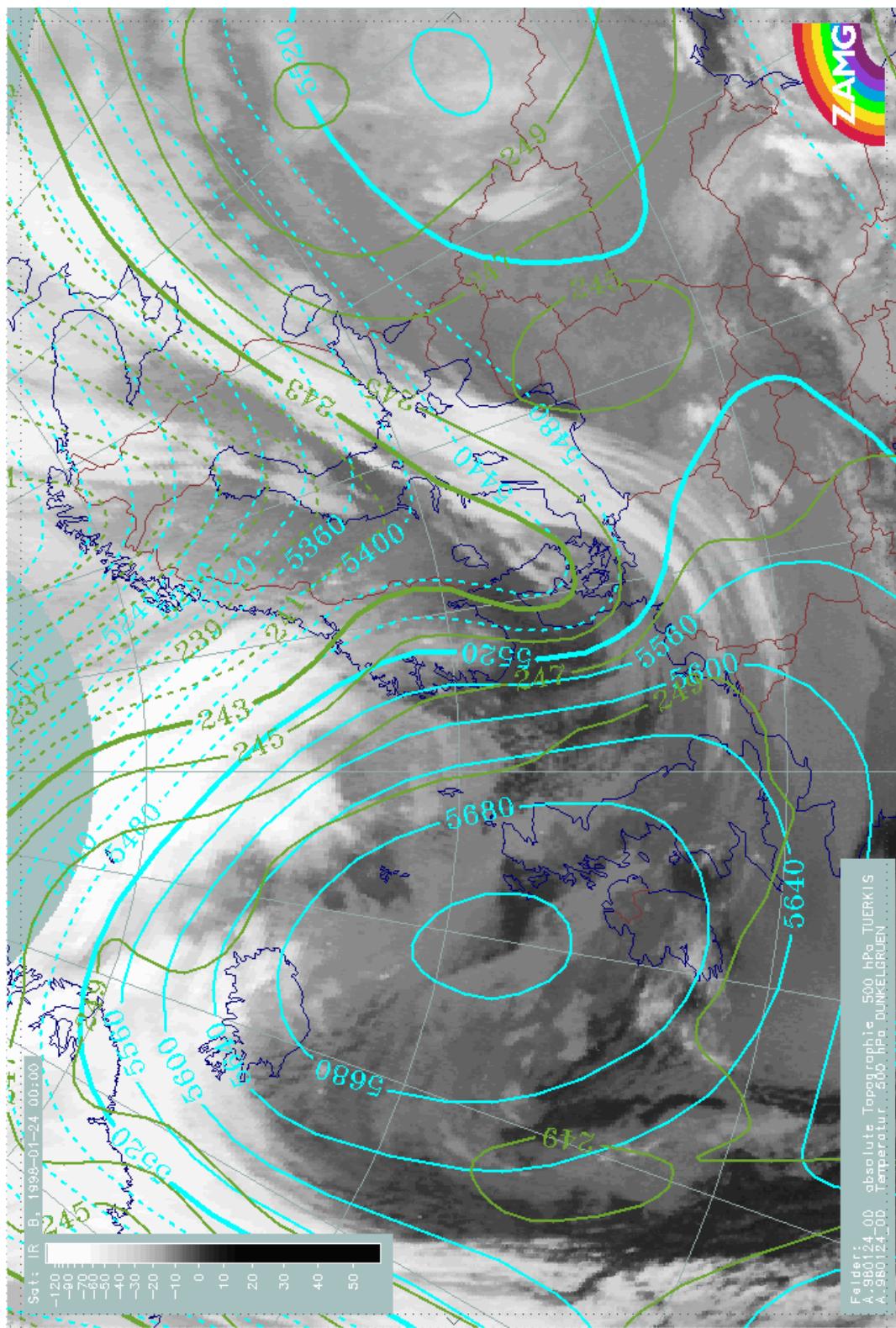


Imagen I.1.b: Fase de ruptura -24 enero 1998/00.00 UTC-. (cont.)

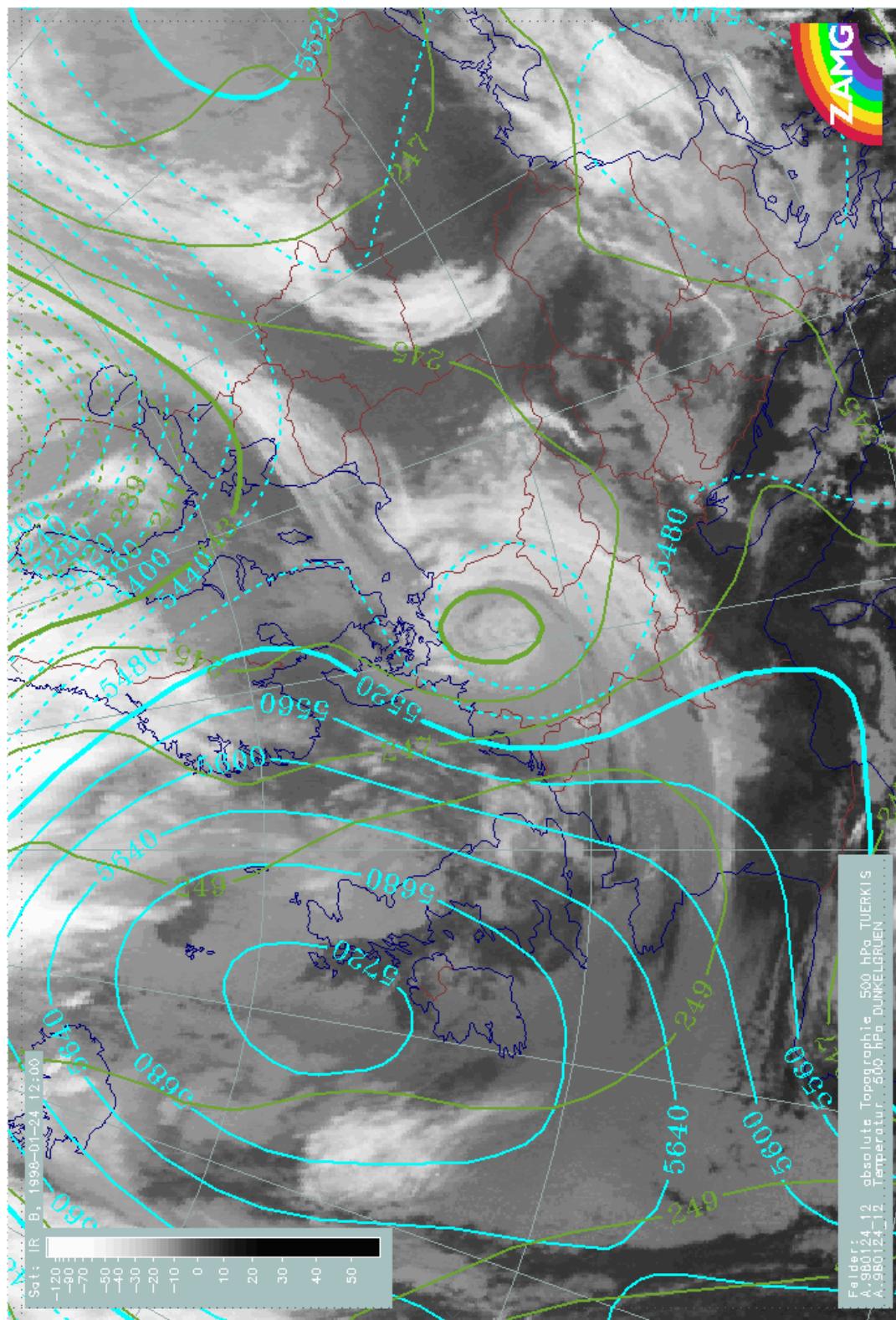


Imagen I.1.c: Fase de aislamiento -24 enero 1998/12.00 UTC-.

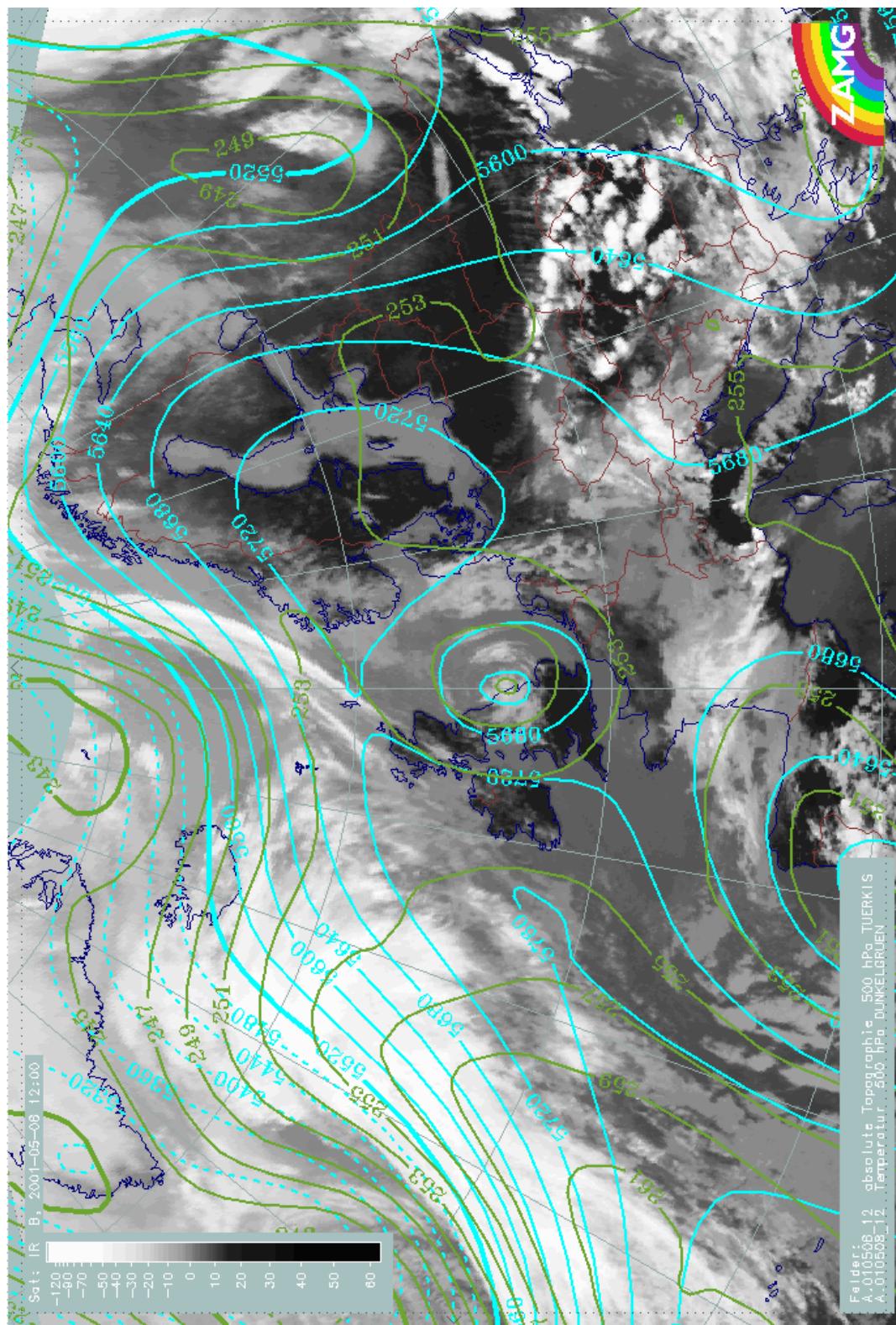
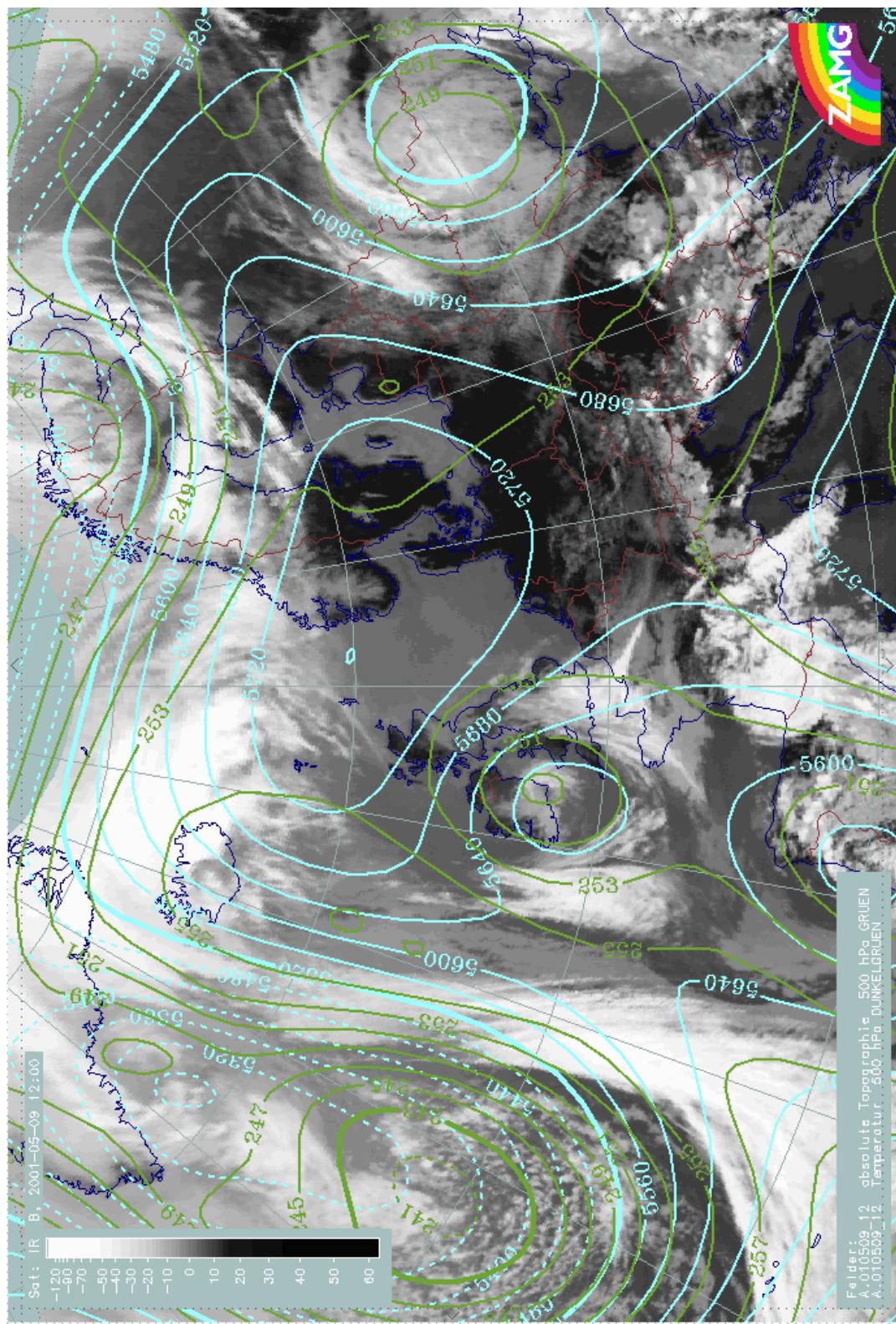


Imagen I.2. (a,b,c): Fase final de una DAN. Imágenes IR del Meteosat de una DAN ocurrida en el periodo del 08-10 de mayo de 2001 sobre Inglaterra, la cual se movía hacia el oeste y fue embebida por la circulación general sobre el océano Atlántico. Las líneas azules representan la altura geopotencial, las verdes la temperatura, en el nivel de 500 hPa.
Imagen I.2.a: 08 mayo 2001/12.00 UTC.



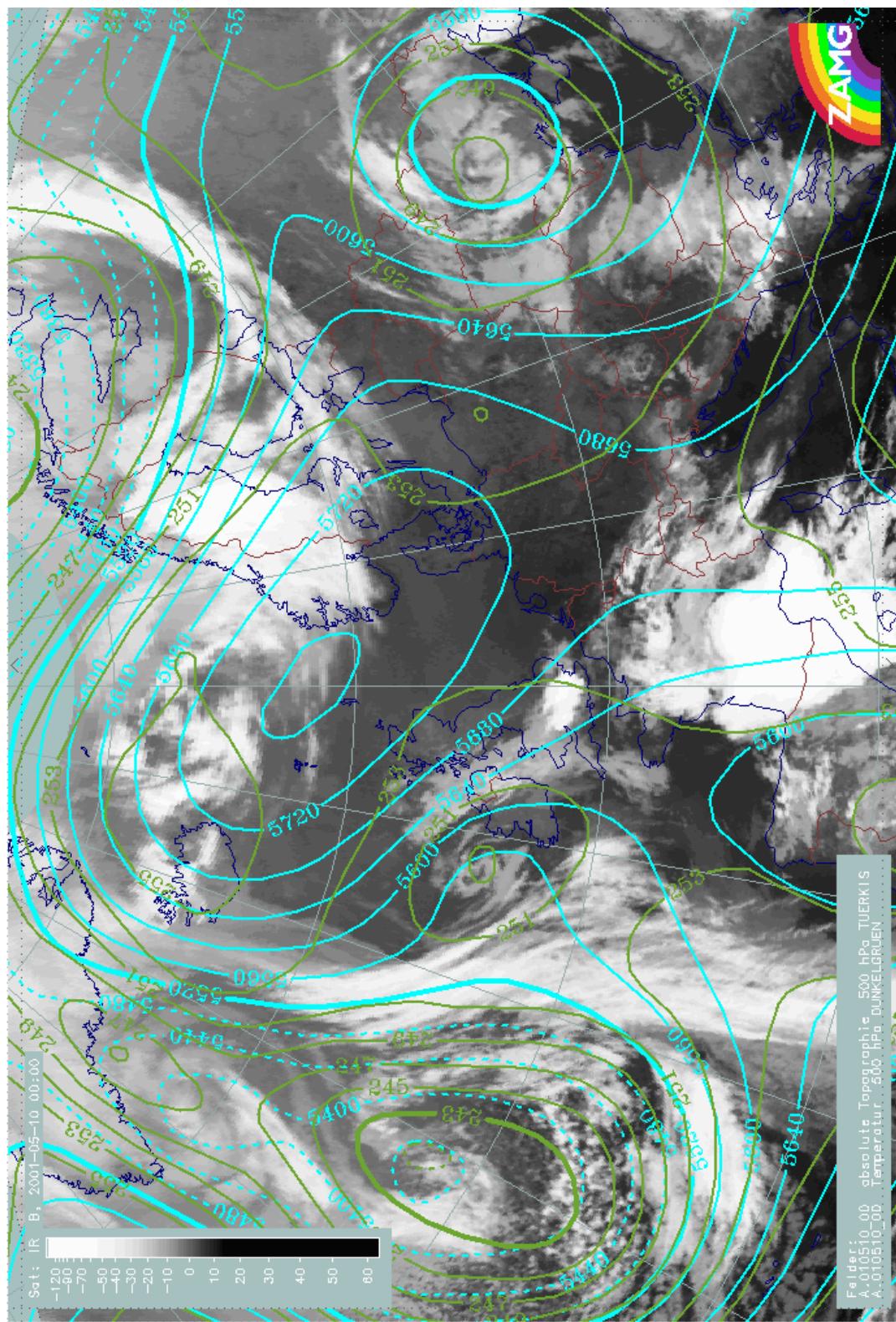


Imagen I.2.c: 10 mayo 2001/12.00 UTC.

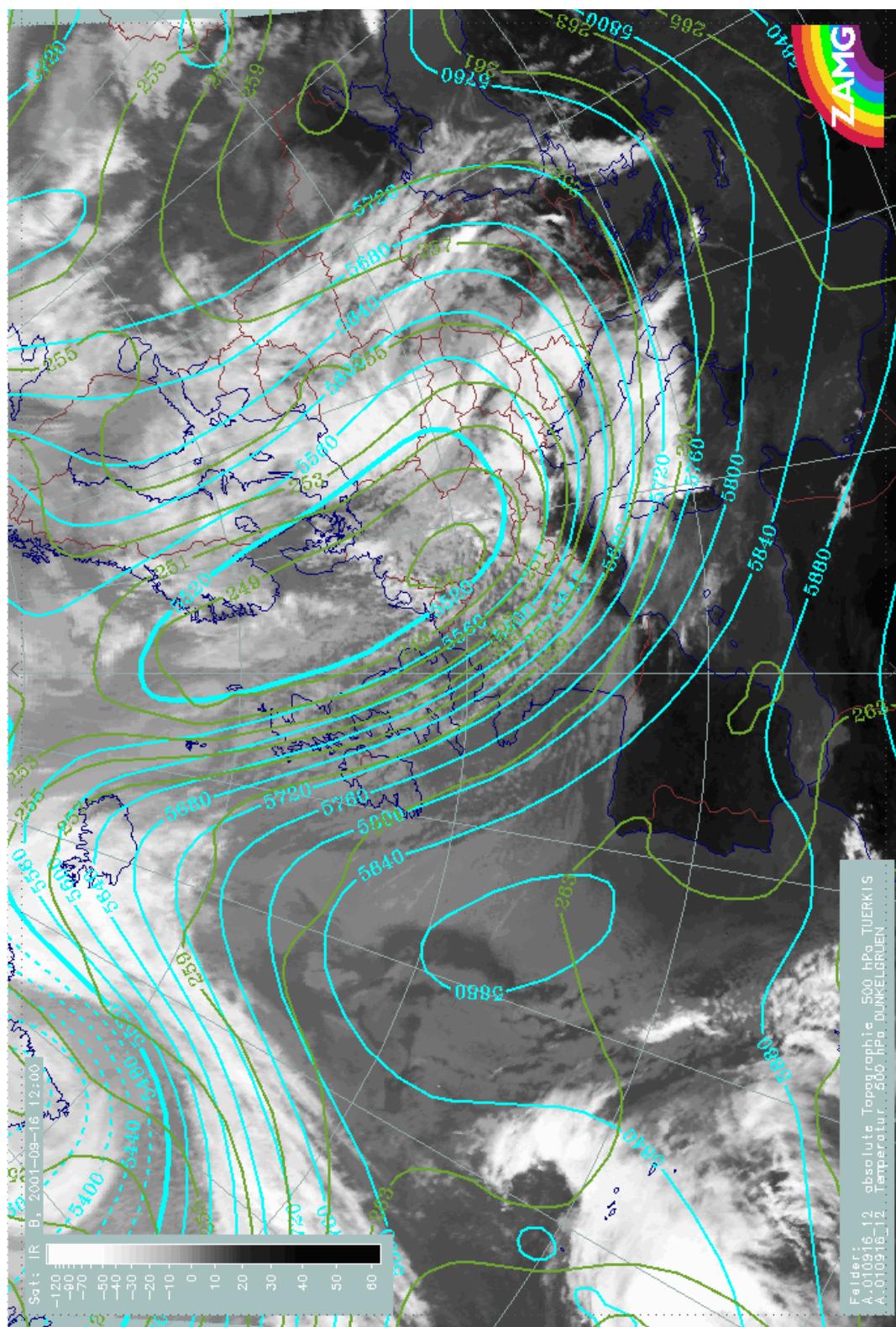


Imagen I.3.(a, b, c y d): Imágenes del Meteosat del canal IR. Muestran el desarrollo de una DANA desde su separación de la circulación general hasta su debilitamiento. Las líneas azules representan la altura geopotencial y las verdes la temperatura en el nivel de 500 hPa.

Imagen I.3.a: 16 septiembre 2001/12.00 UTC: una baja en altura de gran tamaño sobre Alemania y Dinamarca se separa de la circulación general.

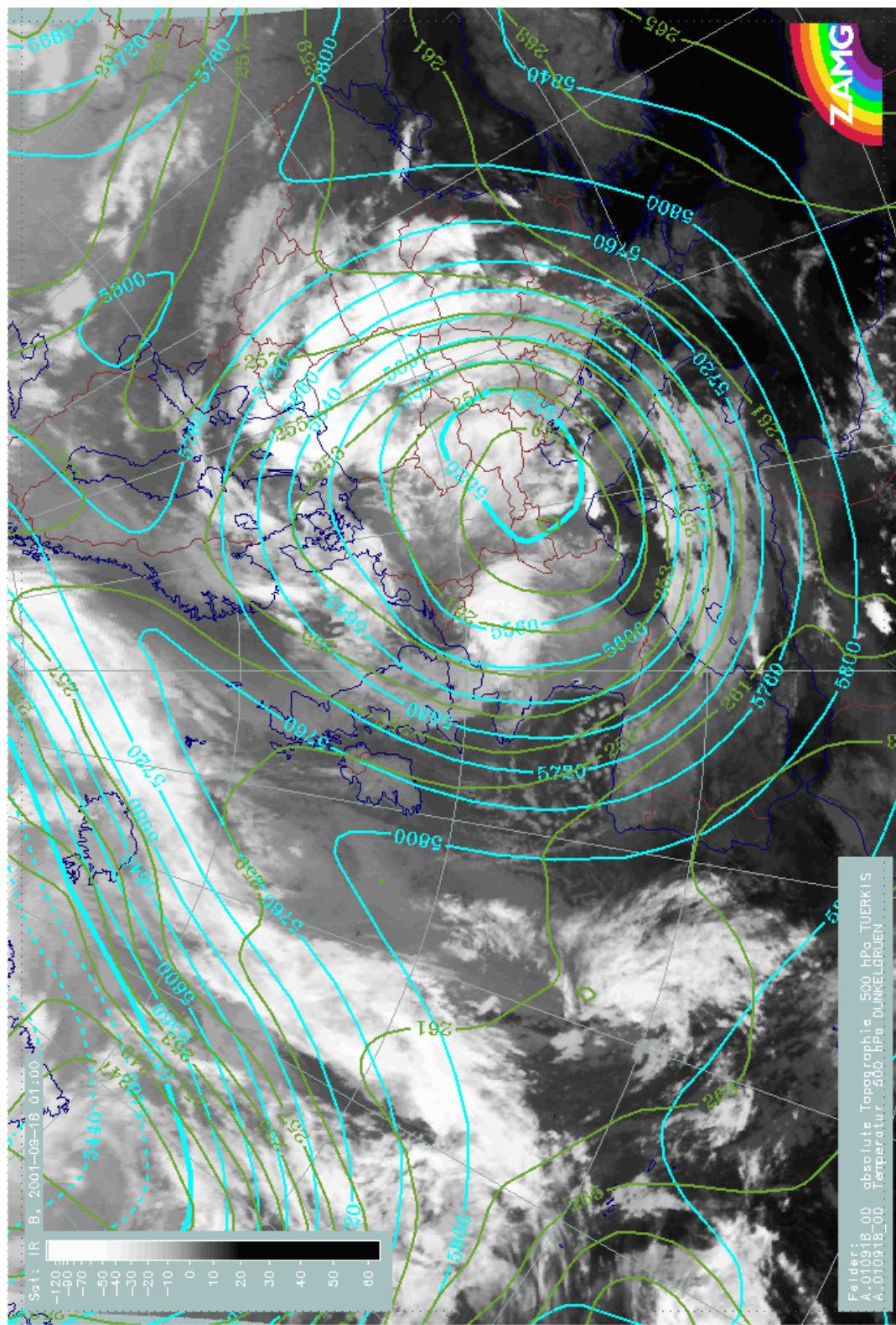


Imagen I.3.b: 18 septiembre 2001/00.00 UTC: se produce un fuerte desarrollo barocílico en los bordes de la baja.

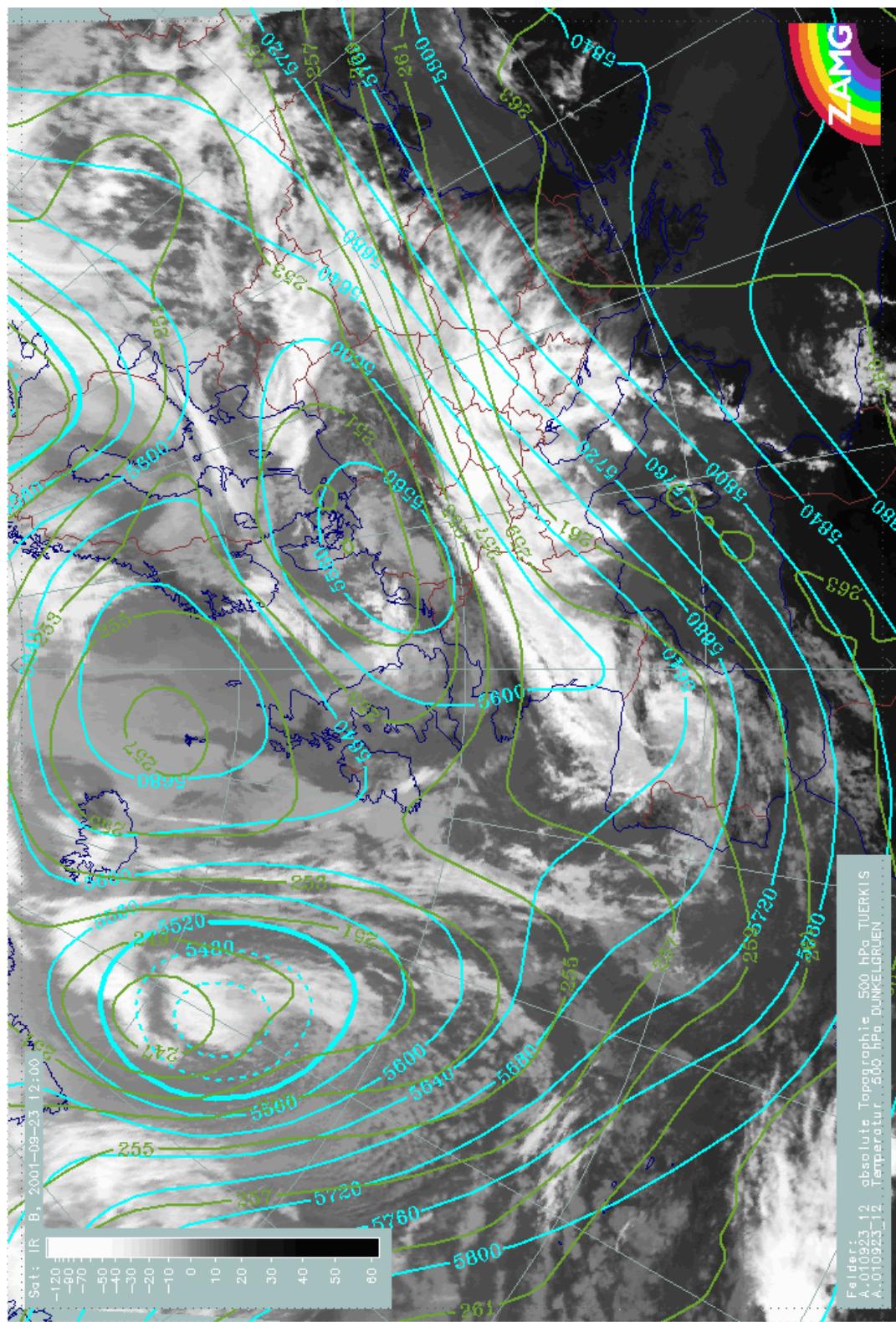


Imagen I.3.c: 23 septiembre 2001/12.00 UTC: se pueden observar tres ciclones, sobre Francia, Dinamarca y Polonia. El desarrollo seguirá durante algunos días y la DANA comenzará a debilitarse lentamente.

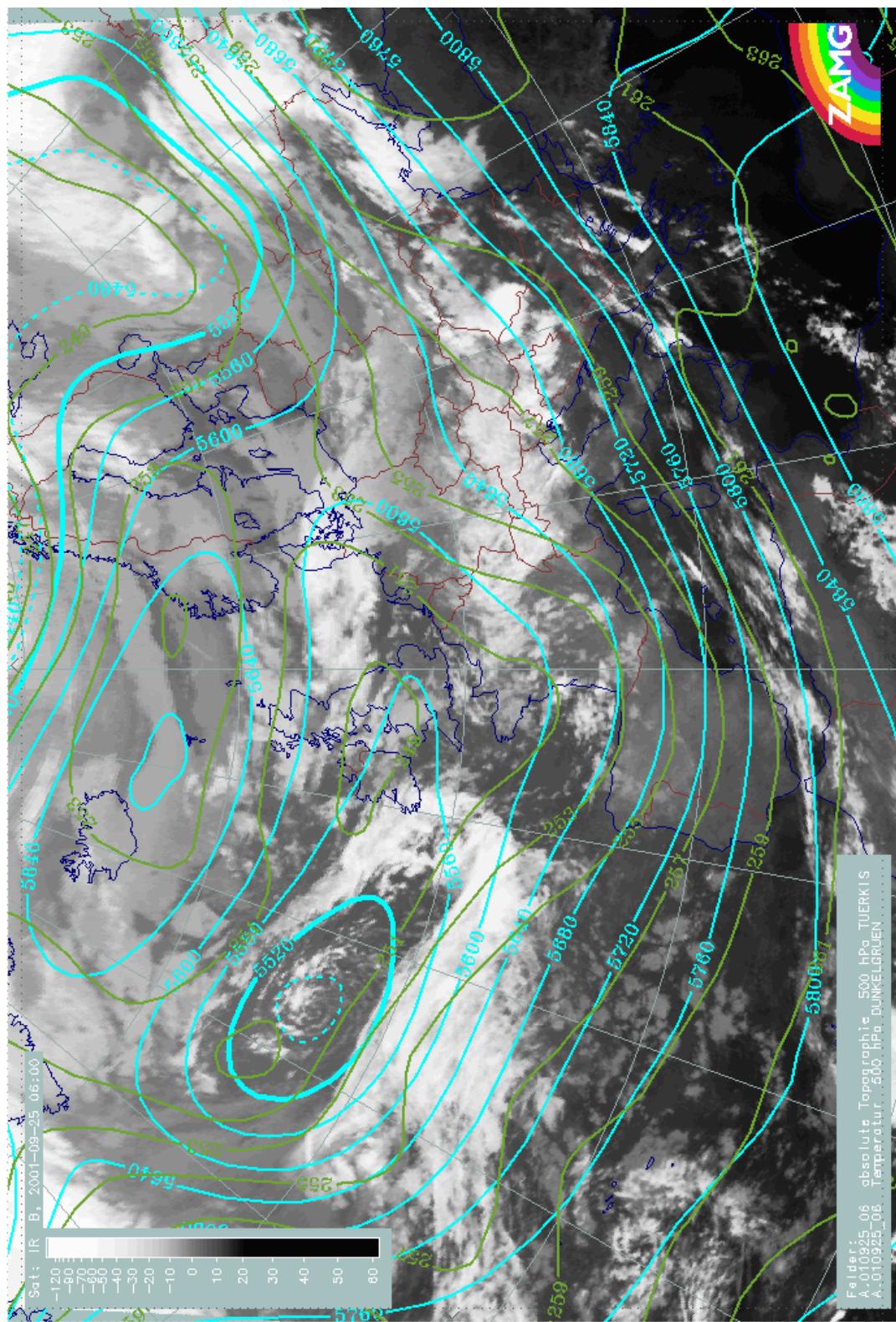


Imagen I.3.d: 25 septiembre 2001/06.00 UTC: las bajas ya casi se han disuelto y sus restos sobre Inglaterra serán capturados por otra DANA que se encuentra sobre el océano Atlántico.

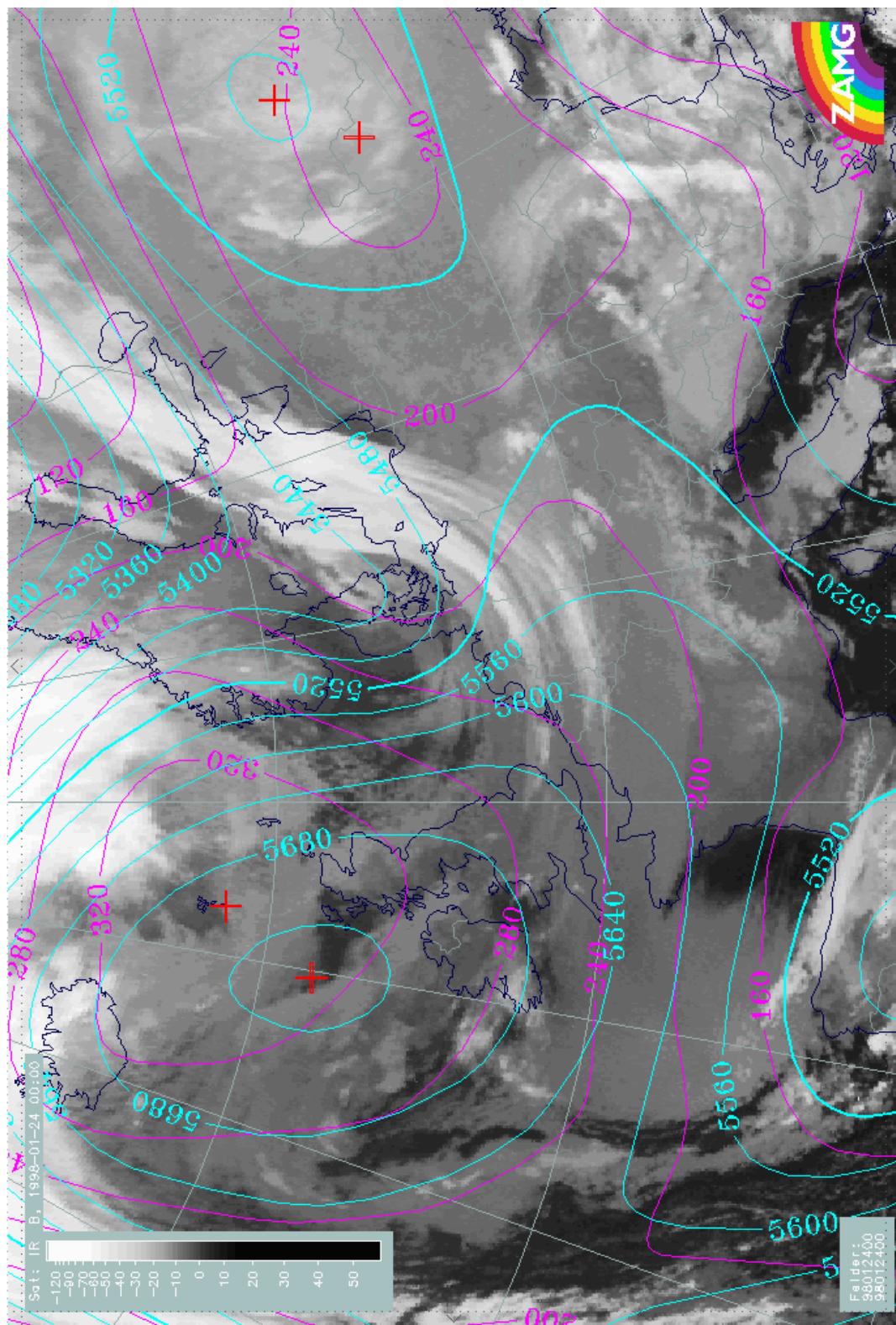


Imagen I.4.(a, b y c): Imágenes del Meteosat del canal IR. Evolución de los campos de geopotencial en los niveles de 500 hPa (líneas color azul) y de 1000 hPa (líneas color magenta), así como de la banda nubosa frontal asociada a la DANA, durante las tres fases de desarrollo.

Imagen I.4.a: Fase de desarrollo de la vanguardia en niveles altos - 24 enero 1998/00.00 UTC.

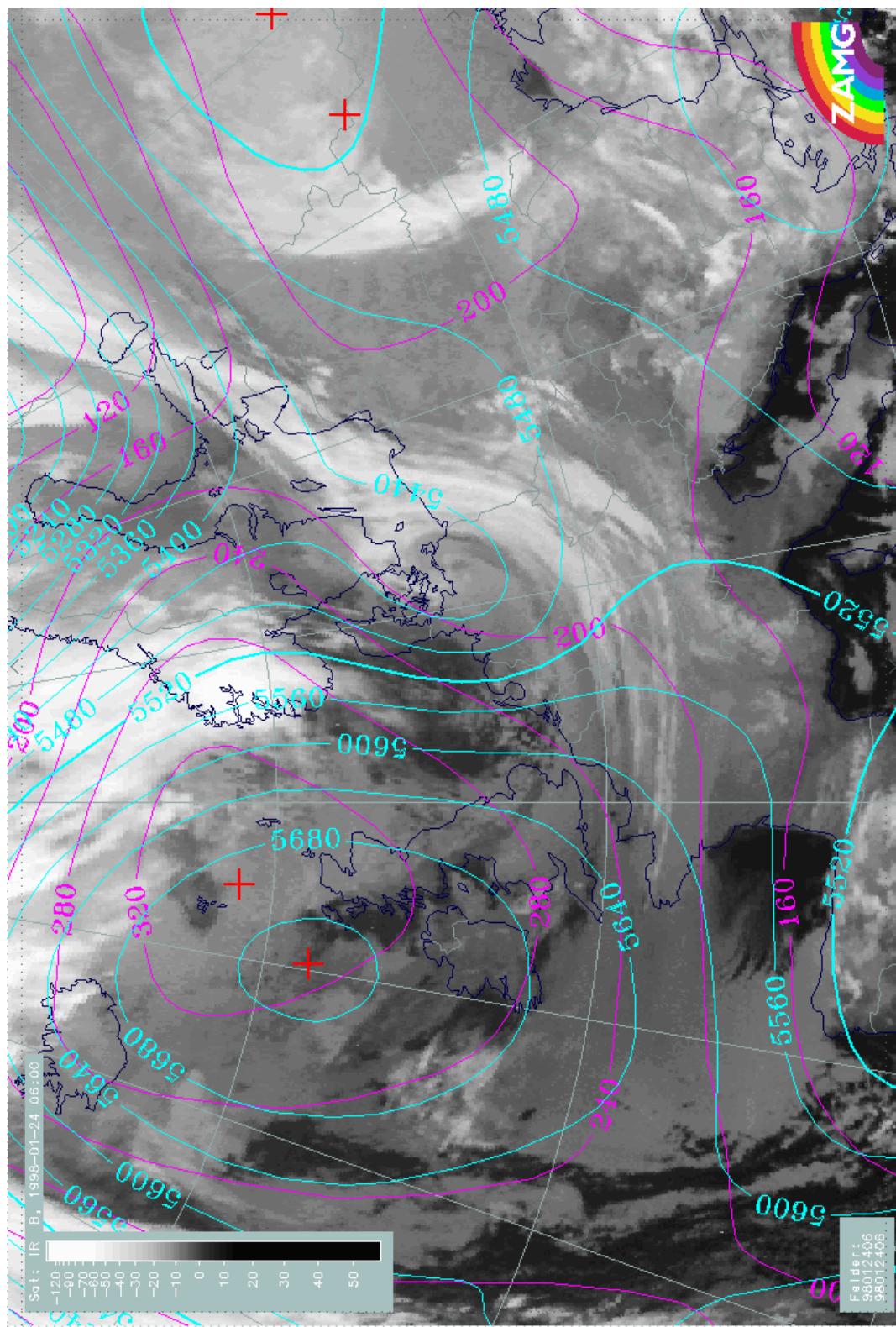
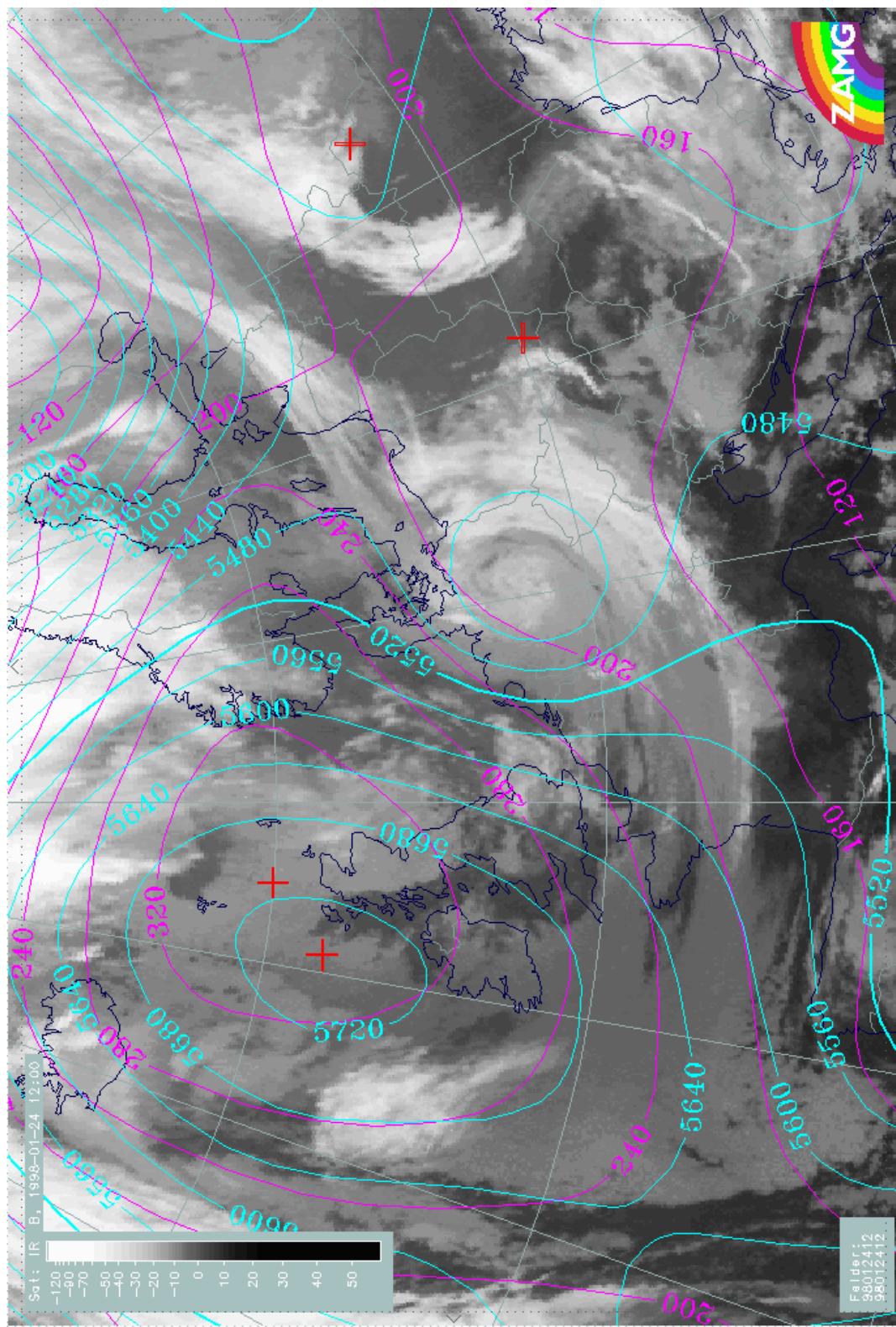


Imagen I.4.b: Fase de ruptura -24 enero 1998/06.00 UTC-.



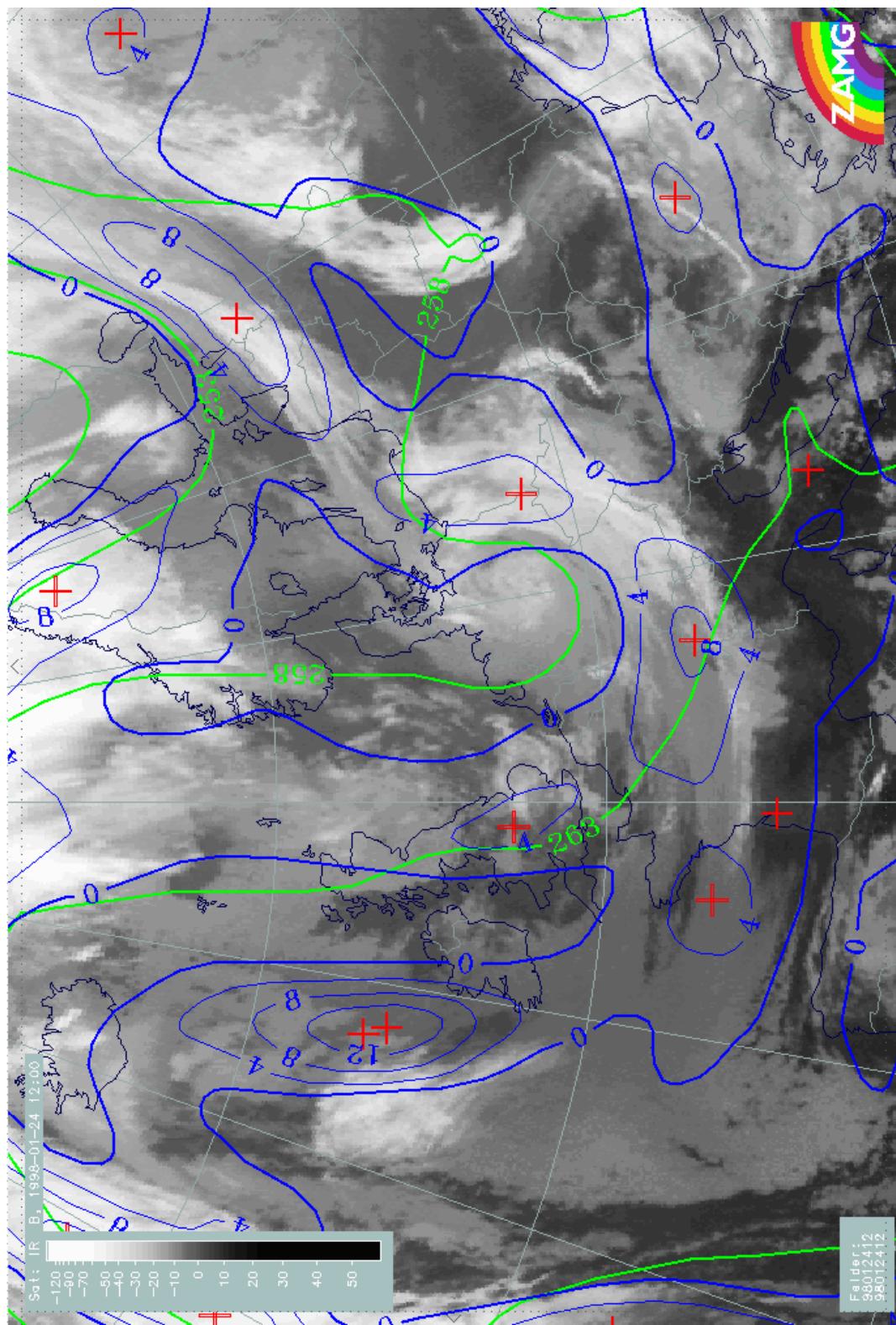


Imagen I.5: Imagen del Meteosat del canal IR de una DANA ocurrida el 24 enero 1998 a las 12.00 UTC en la cual se superponen las líneas de espesor equivalente entre 500/850 hPa (líneas de color verde) y de PFT entre 500/850 hPa (líneas de color azul).

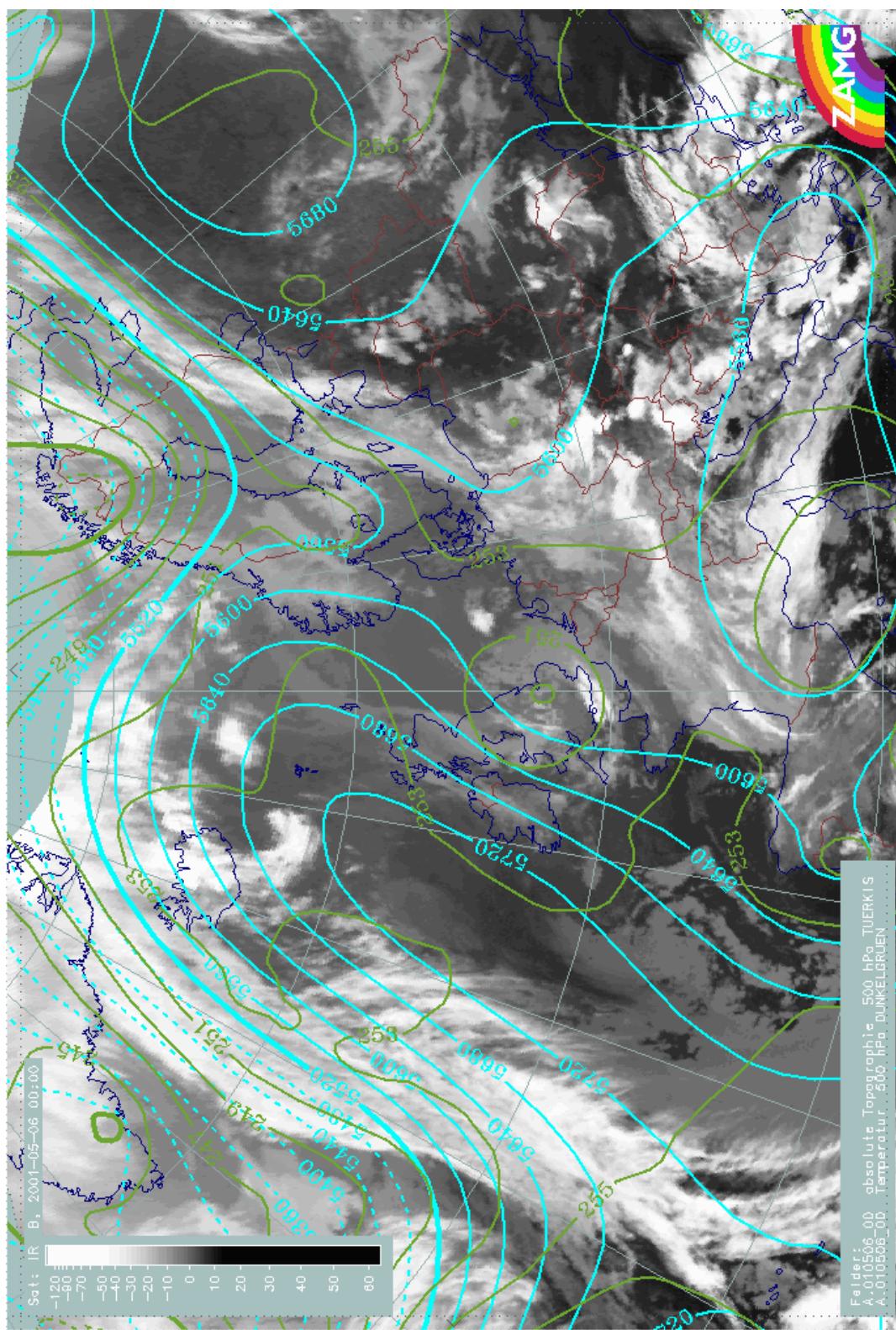


Imagen I.6.(a, b y c): Imágenes del Meteosat del canal IR donde se observa la evolución de los campos superpuestos de geopotencial (líneas azules) y temperatura (líneas verdes) en el nivel de 500 hPa.

Imagen I.6.a: Fase de desarrollo de la vanguardia en niveles altos -06 mayo 2001/00.00 UTC.

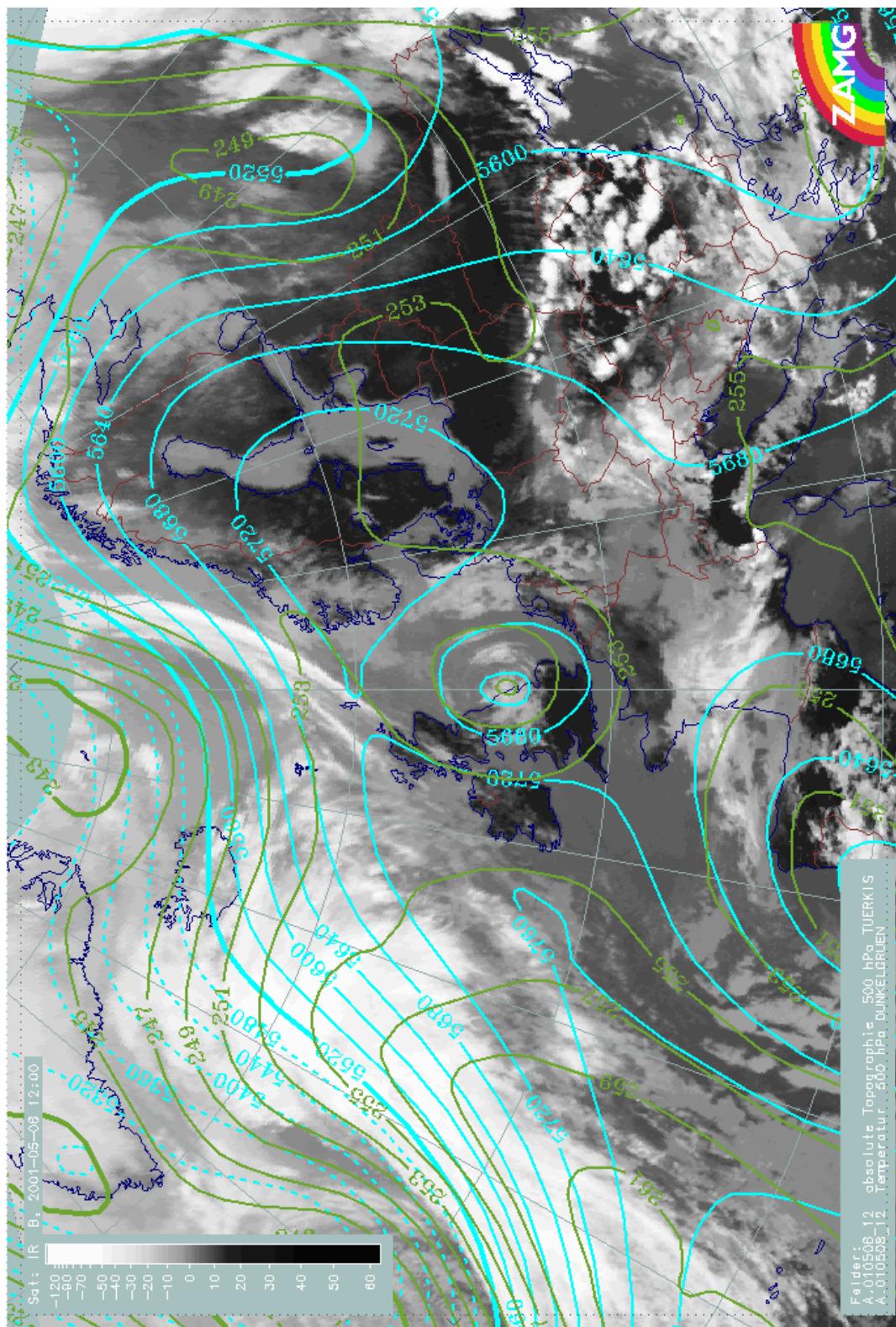


Imagen I.6.b: Fase de aislamiento -08 mayo 2001/00.00 UTC-.

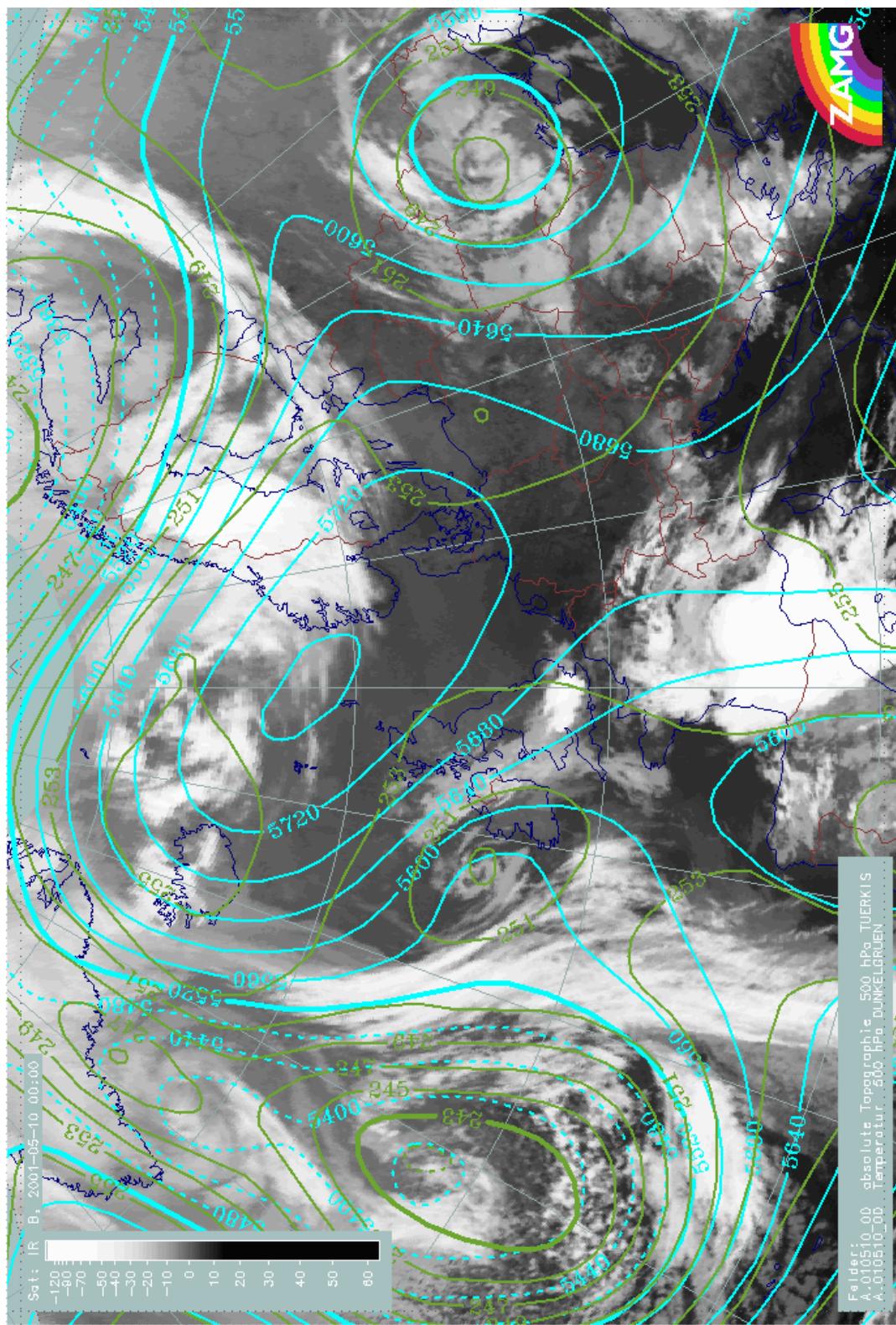


Imagen I.6.c: Fase final -10 mayo 2001/00.00 UTC-.

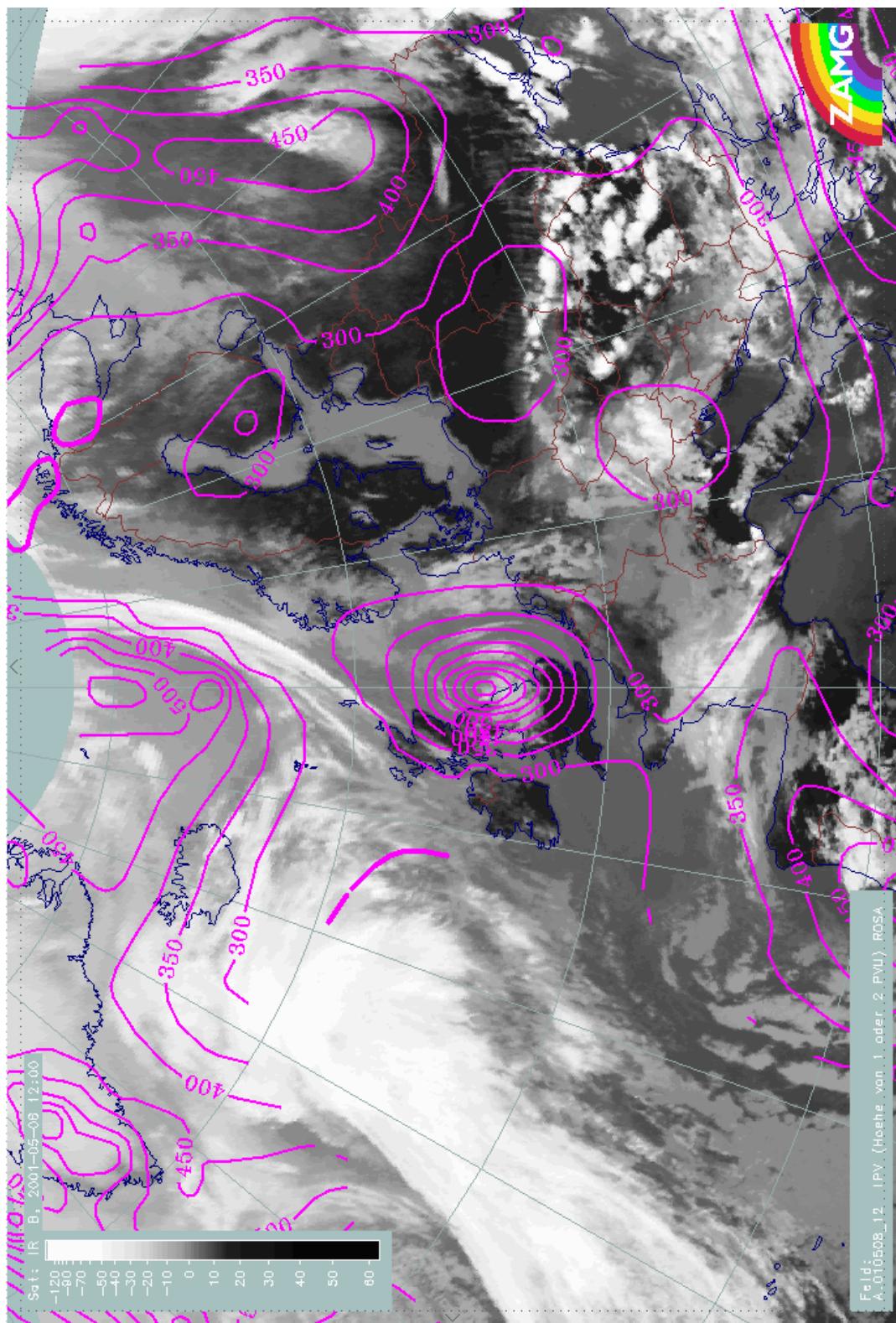


Imagen I.7: Imagen del Meteosat del canal IR donde se observa el campo superpuesto de vorticidad potencial VP=1 unidad (líneas color magenta) -06 mayo 2001/12.00 UTC-.

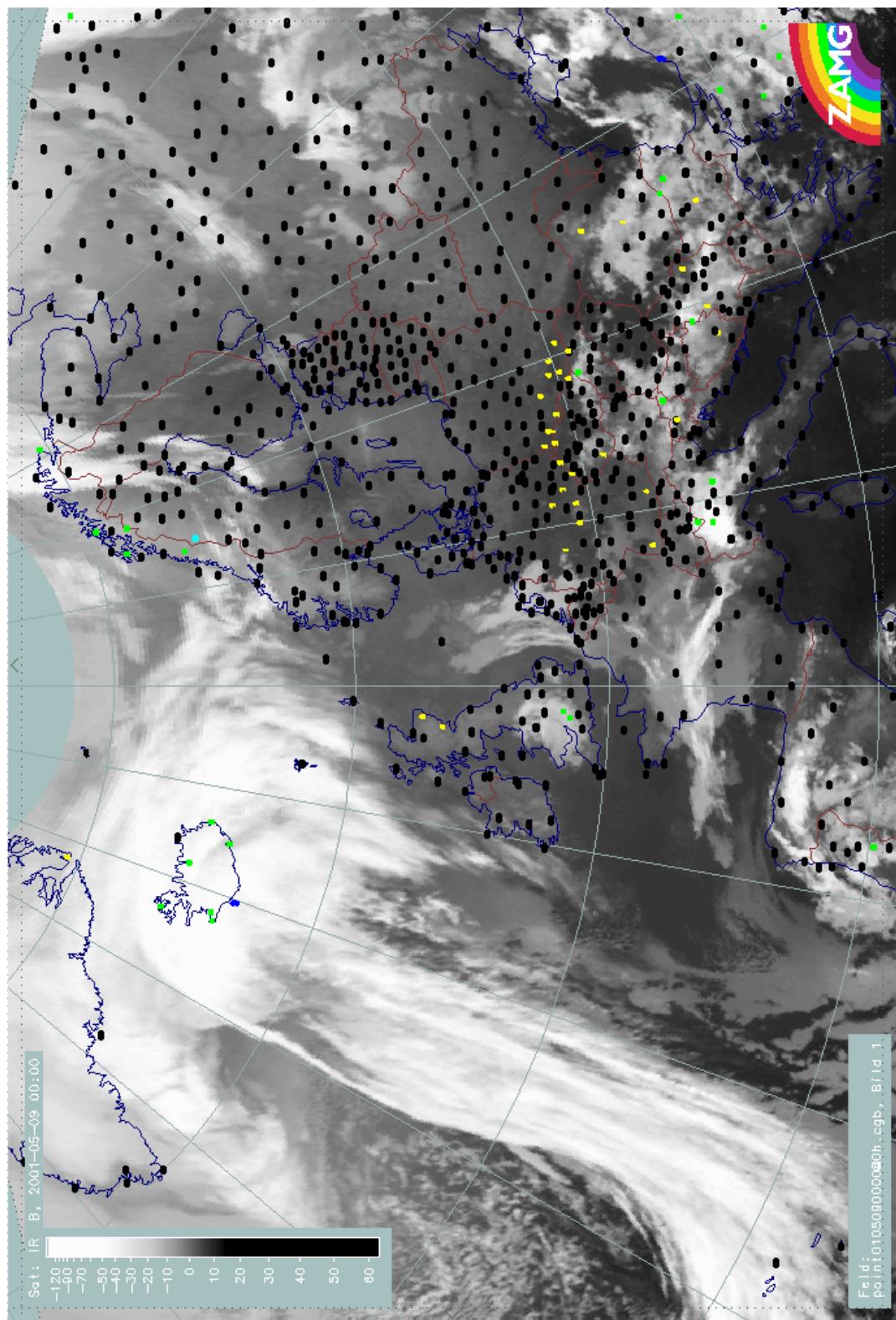


Imagen I.8: Imagen del Meteosat del canal IR para el dia 09 mayo 2001/00.00 UTC en la que se representa el tiempo presente asociado a una DANA formada sobre océano. Los puntos verdes representan precipitaciones en forma de lluvia y de chubascos, en azul: nieve, en amarillo: nieblas y brumas y en negro: sin precipitación.

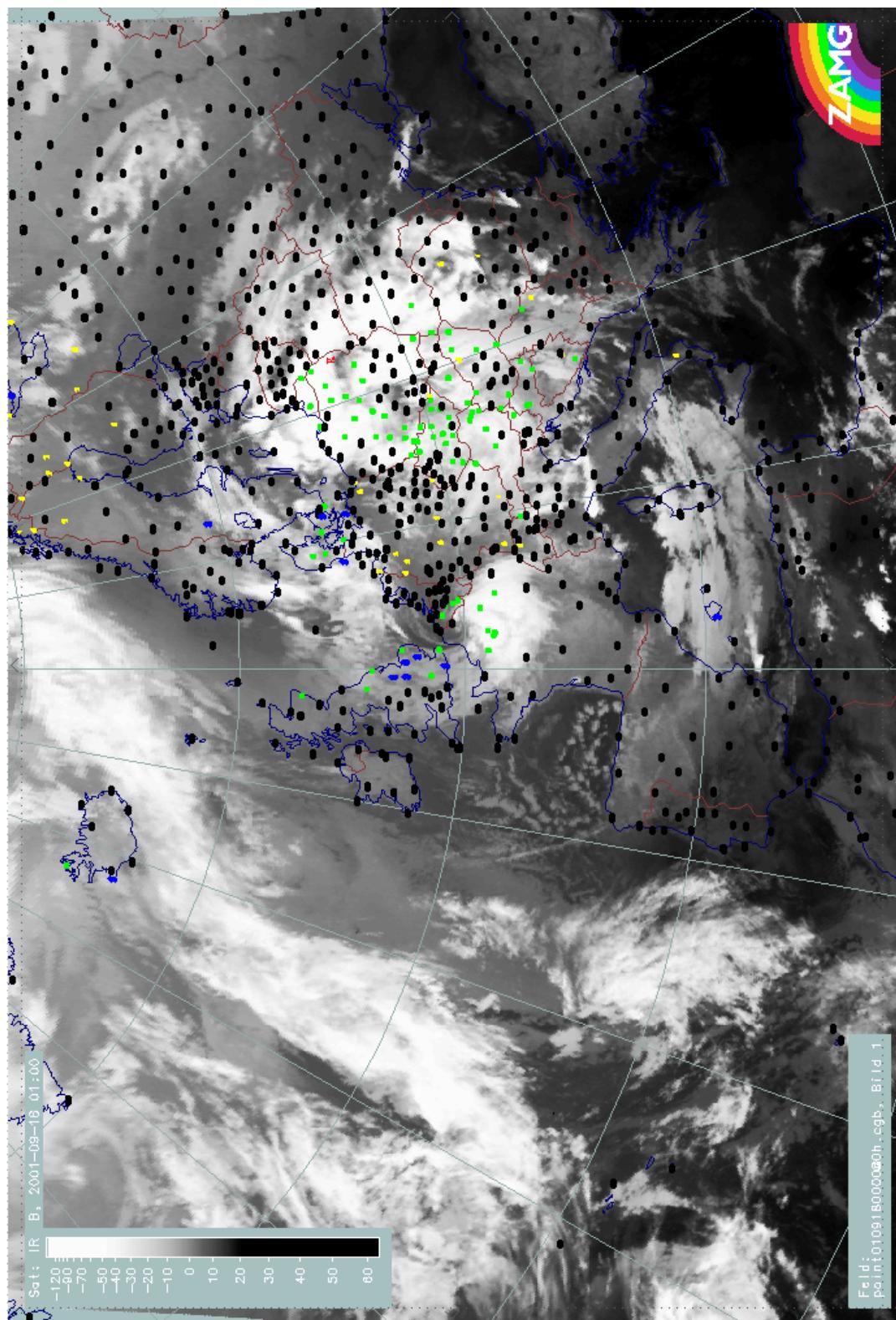


Imagen I.9: Imagen del Meteosat del canal IR para el día 18 mayo 2001/00.00 UTC en la que se representa el tiempo presente asociado a una DANA sobre continente. Los puntos verdes representan precipitaciones en forma de lluvia y de chubascos, en azul: nieve, en amarillo: nieblas y brumas y en negro: sin precipitación.

Anexo II:
Tablas del capítulo 3

Tabla II.1: Código, nombre, coordenadas geográficas y altura de cada observatorio de la red de estaciones principal y secundaria del INM utilizada para el cálculo de las precipitaciones asociadas a las DANAS.

Código	Nombre	Longitud (º)	Latitud (º)	Altitud (m)
1387	A CORUÑA-ESTACION CO	-8,42	43,37	58
1499	PUNTO CENTRO	-7,48	43,25	443
1505	ROZAS 'AERODROMO'	-7,46	43,12	444
1212E	RANON 'AEROPUERTO DE	-6,03	43,56	127
1110	SANTANDER 'CENTRO'	-3,82	43,46	64
1111	SANTANDER 'CMT'	-3,8	43,49	52
1082	BILBAO 'AEROPUERTO'	-2,91	43,3	39
1024E	SAN SEBASTIAN 'IGUELDO'	-2,04	43,31	252
1428	SANTIAGO COMPOSTELA	-8,43	42,9	364
1484	PONTEVEDRA 'INSTITUTO	-8,65	42,43	19
1484C	PONTEVEDRA-MOURENTE	-8,62	42,44	107
1495	VIGO 'PEINADOR'	-8,63	42,22	255
1690A	OURENSE 'GRANXA DEPU	-7,86	42,33	143
2661	LEON 'VIRGEN del CAMINO'	-5,65	42,59	916
2401	PALENCIA 'OBSERVATORIO'	-4,54	42,01	750
2400E	OBSERVATORIO METEORO	-4,6	42	860
2331	BURGOS 'VILLAFRIA'	-3,63	42,36	890
9087	VITORIA AERODROMO	-2,65	42,85	521
9091O	VITORIA 'AEROPUERTO	-2,72	42,88	508
9170	LOGROÑO-AGONCILLO	-2,33	42,45	352
9898	HUESCA MONFLORITE	-0,33	42,08	541
2614	ZAMORA 'OBSERVATORIO'	-5,73	41,52	656
2539	VALLADOLID 'VILLANUBLA'	-4,85	41,7	846
9434	ZARAGOZA AEROPUERTO	-1,01	41,66	247
42	TARRAGONA	1,25	41,12	58
0042C	TARRAGONA 'PLA«A IMP	1,24	41,12	37
76	AEROPORT de BARCELONA	2,08	41,3	6
367	AEROPORT DE GIRONA	2,76	41,9	127
2867	SALAMANCA 'MATACAN'	-5,5	40,95	790
2444C	AVILA-AYUNTAMIENTO-	-4,7	40,66	1143
2444	AVILA 'OBSERVATORIO'	-4,68	40,65	1130
2465	SEGOVIA 'OBSERVATORIO'	-4,13	40,95	1005
3129	MADRID/BARAJAS	-3,54	40,45	582
3168A	GUADALAJARA INSTITUTO	-3,16	40,63	685
3168C	GUADALAJARA 'EL SERR	-3,17	40,66	635
8096	CUENCA	-2,14	40,07	956
8369A	TERUEL ESCUELA NORMAL	-1,1	40,34	915
8368U	TERUEL	-1,12	40,35	900
3469	CACERES 'OBSERVATORI	-6,37	39,48	459
3469A	CACERES 'CARRETERA T	-6,34	39,47	405
3259	TOLEDO LORENZANA	-4,02	39,86	540

3260B	TOLEDO 'BUENAVISTA'	-4,05	39,88	516
8175	ALBACETE/LOS LLANOS	-1,86	38,95	704
8414	MANISES BASE AEREA	-0,47	39,48	50
8414A	VALENCIA MANISES	-0,47	39,49	57
8501	CASTELLON DE LA PLANA	-0,04	39,99	25
8500A	CASTELLON ALMAZORA	-0,02	39,95	35
B278A	PALMA DE MALLORCA AE	2,73	39,55	2
B278	PALMA 'AEROPUERTO SO	2,74	39,57	4
B893	MAHON 'AEROPUERTO DE	4,23	39,87	85
4452	BADAJOZ/TALAVERA 'BA	-6,83	38,88	185
4121	CIUDAD REAL 'ESCUELA	-3,92	38,99	627
8019	ALICANTE EL ALTET	-0,56	38,29	31
4605	HUELVA	-6,95	37,26	17
4642E	HUELVA 'RONDA ESTE'	-6,91	37,28	19
5783	SEVILLA 'AEROPUERTO'	-5,9	37,42	26
5796	MORON FRA 'BASE AERE	-5,62	37,16	87
5402	CORDOBA 'AEROPUERTO'	-4,85	37,84	91
5270	JAEN-INSTITUTO	-3,79	37,78	510
5270B	JAEN 'CERRO DE LOS L	-3,81	37,78	580
5530E	GRANADA/AEROPUERTO	-3,78	37,19	570
7182A	MURCIA UNIVERSIDAD	-1,13	37,99	63
7182	MURCIA ALFONSO X	-1,13	37,99	57
7178I	MURCIA	-1,17	38	62
5973	CADIZ 'CORTADURA'	-6,26	36,5	8
6155A	MALAGA-AEROPUERTO	-4,49	36,67	7
6325O	ALMERIA-AEROPUERTO	-2,39	36,84	20
6000X	MELILLA-FARO	-2,94	35,29	35
6000A	MELILLA	-2,96	35,28	55

Tabla II.2: Código, nombre, número de medidas registradas por cada estación, número de lagunas en los datos de cada estación y fecha de inicio y final del registro de datos de cada observatorio de la red principal y secundaria de estaciones del INM utilizada para el cálculo de la precipitación asociada a las DANAs.

Código	Nombre	N valores	N lagunas	Fecha inicio	Fecha final
1387	A CORUÑA-ESTACION CO	16759	42	01/01/1958	31/12/2003
1499	PUNTO CENTRO	7852	0	01/11/1963	30/04/1985
1505	ROZAS 'AERODROMO'	6546	30	01/05/1985	31/12/2003
1212E	RANON 'AEROPUERTO DE	12817	28	01/08/1968	31/12/2003
1110	SANTANDER 'CENTRO'	14342	23	01/01/1958	30/04/1997
1111	SANTANDER 'CMT'	3560	335	01/01/1958	31/12/2003
1082	BILBAO 'AEROPUERTO'	16728	11	01/01/1958	31/12/2003
1024E	SAN SEBASTIAN 'IGUELDO'	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
1428	SANTIAGO COMPOSTELA	16781	20	01/01/1958	31/12/2003
1484	PONTEVEDRA 'INSTITUTO'	7991	45	01/10/1963	30/09/1985
1484C	PONTEVEDRA-MOURENTE	6665	1	01/10/1985	31/12/2003
1495	VIGO 'PEINADOR'	16799	2	01/01/1958	31/12/2003
1690A	OURENSE 'GRANXA DEP.'	12931	158	01/08/1960	31/12/2003
2661	LEON 'VIRGEN del CAMINO'	16796	5	01/01/1958	31/12/2003
2401	PALENCIA 'OBSERVATORIO'	10314	4	01/01/1958	31/12/1988
2400E	OBSERVATORIO METEORO	2307	159	01/04/1997	31/12/2003
2331	BURGOS 'VILLAFRIA'	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
9087	VITORIA AERODROMO	8104	22	01/01/1958	31/03/1980
9091O	VITORIA 'AEROPUERTO	9508	19	01/07/1977	31/12/2003
9170	LOGROÑO-AGONCILLO	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
9898	HUESCA MONFLORITE	16340	3	01/01/1958	31/12/2003
2614	ZAMORA 'OBSERVATORIO'	16779	22	01/01/1958	31/12/2003
2539	VALLADOLID 'VILLANUBLA'	16783	18	01/01/1958	31/12/2003
9434	ZARAGOZA AEROPUERTO	16770	0	01/01/1958	31/12/2003
42	TARRAGONA	5506	1	01/02/1958	28/02/1973
0042C	TARRAGONA 'PLA	536	2	01/03/1973	03/11/1987
76	AEROPORT de BARCELONA	16768	33	01/01/1958	31/12/2003
367	AEROPORT de GIRONA	11310	12	01/01/1973	31/12/2003
2867	SALAMANCA 'MATACAN'	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
2444C	AVILA-AYUNTAMIENTO-	9162	28	01/01/1958	28/02/1983
2444	AVILA 'OBSERVATORIO'	7639	0	01/02/1983	31/12/2003
2465	SEGOVIA 'OBSERVATORIO'	5601	30	01/11/1966	31/12/2003
3129	MADRID/BARAJAS	16789	12	01/01/1958	31/12/2003
3168A	GUADALAJARA INSTITUTO	9965	50	01/01/1958	30/04/1986
3168C	GUADALAJARA 'EL SERR	5372	14	01/11/1985	31/12/2003
8096	CUENCA	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
8369A	TERUEL ESCUELA NORMAL	3256	0	01/02/1971	31/12/1979
8368U	TERUEL	6484	0	01/04/1986	31/12/2003
3469	CACERES 'OBSERVATORIO'	10590	2	01/01/1958	31/12/1986

3469A	CACERES 'CARRETERA T	7686	15	01/12/1982	31/12/2003
3259	TOLEDO LORENZANA	8886	0	01/01/1958	30/04/1982
3260B	TOLEDO 'BUENAVISTA'	8004	0	01/02/1982	31/12/2003
8175	ALBACETE/LOS LLANOS	16638	132	01/01/1958	31/12/2003
8414	MANISES BASE AEREA	4737	11	01/01/1958	31/12/1970
8414A	VALENCIA MANISES	13879	0	01/01/1966	31/12/2003
8501	CASTELLON de LA PLANA	6573	1	01/01/1958	31/12/1975
8500A	CASTELLON ALMAZORA	10223	4	01/01/1976	31/12/2003
B278A	PALMA DE MALLORCA AE	4515	81	01/01/1960	31/07/1972
B278	PALMA 'AEROPUERTO SO	11445	0	01/08/1972	31/12/2003
B893	MAHON 'AEROPUERTO'	13286	137	01/01/1965	31/12/2003
4452	BADAJOZ/TALAVERA	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
4121	CIUDAD REAL 'ESCUELA	12114	0	01/11/1970	31/12/2003
8019	ALICANTE EL ALTET	13443	12	01/03/1967	31/12/2003
4605	HUELVA	9648	0	01/01/1958	31/05/1984
4642E	HUELVA 'RONDA ESTE'	7153	0	01/06/1984	31/12/2003
5783	SEVILLA 'AEROPUERTO'	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
5796	MORON FRA 'BASE AEREA'	16757	44	01/01/1958	31/12/2003
5402	CORDOBA 'AEROPUERTO'	14835	22	01/04/1959	31/12/2003
5270	JAEN-INSTITUTO	9302	44	01/01/1958	31/08/1983
5270B	JAEN 'CERRO DE LOS L	6610	29	01/08/1983	31/12/2003
5530E	GRANADA/AEROPUERTO	11504	2	01/07/1972	31/12/2003
7182A	MURCIA UNIVERSIDAD	6634	0	01/01/1958	29/02/1976
7182	MURCIA ALFONSO X	13240	0	01/09/1967	31/12/2003
7178I	MURCIA	7214	0	01/04/1984	31/12/2003
5973	CADIZ 'CORTADURA'	16059	102	01/01/1958	31/12/2003
6155A	MALAGA-AEROPUERTO	16801	0	01/01/1958	31/12/2003
6325O	ALMERIA-AEROPUERTO	13118	0	01/02/1968	31/12/2003
6000X	MELILLA - FARO	2218	3	01/05/1961	30/04/1969
6000A	MELILLA	12175	0	01/09/1970	31/12/2003

Tabla II.3: Código, nombre, coordenadas geográficas y altura de cada observatorio de la red principal de datos meteorológicos (SINOP) del INM utilizada para el cálculo del campo de nubosidad asociada a las DANAs.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m)
8001	A CORUÑA	43.37	-8.42	67
8008	LUGO/ROZAS	43.12	-7.45	446
8011	ASTURIAS/AVILÉS	43.55	-6.03	130
8023	SANTANDER	43.48	-3.80	59
8025	BILBAO/SONDICA	43.30	-2.90	39
8027	SAN SEBASTIAN/IGUELDO	43.30	-2.03	259
8042	SANTIAGO/LABACOLLA	42.90	-8.43	367
8044	PONTEVEDRA	42.43	-8.62	108
8045	VIGO/PEINADOR	42.23	-8.63	255
8048	OURENSE	42.33	-7.87	147
8055	LEON/VIRGEN DEL CAMINO	42.58	-5.65	914
8072	PALENCIA-AUTILLA PIN	42.00	-4.60	860
8075	BURGOS/VILLAFRÍA	42.35	-3.63	890
8080	VITORIA	42.88	-2.72	510
8084	LOGRONO/AGONCILLO	42.45	-2.33	363
8094	HUESCA/MONFLORITE	42.08	-0.33	554
8130	ZAMORA	41.52	-5.73	667
8140	VALLADOLID/VILLANUBL	41.72	-4.85	846
8160	ZARAGOZA/AEROPUERTO	41.67	-1.00	258
8175	REUS/AEROPUERTO	41.15	1.17	76
8181	BARCELONA/AEROPUERTO	41.28	2.07	6
8184	GERONA/COSTA BRAVA	41.90	2.77	129
8202	SALAMANCA/MATACÁN	40.95	-5.50	794
8210	ÁVILA	40.65	-4.70	1131
8213	SEGOVIA	40.95	-4.12	1006
8221	MADRID/BARAJAS	40.50	-3.58	633
8226	GUADALAJARA	40.67	-3.17	640
8231	CUENCA	40.07	-2.13	946
8235	TERUEL	40.35	-1.12	902
8261	CACERES	39.47	-6.33	405
8272	TOLEDO	39.88	-4.05	516
8280	ALBACETE/LOS LLANOS	38.95	-1.85	704
8284	VALENCIA/AEROPUERTO	39.50	-0.47	62
8286	CASTELLÓN	39.95	-0.07	35
8306	PALMA DE MALLORCA/S	39.55	2.73	7
8314	MENORCA/MAHÓN	39.87	4.23	86
8330	BADAJOZ/TALAVERA LA REAL	38.88	-6.83	192
8348	CIUDAD REAL	38.98	-3.92	629
8360	ALICANTE/EL ALTET	38.28	-0.55	31
8383	HUELVA	37.28	-6.92	20
8391	SEVILLA/SAN PABLO	37.42	-5.90	31
8397	MORÓN DE LA FRONTERA	37.15	-5.62	88
8410	CÓRDOBA/AEROPUERTO	37.85	-4.85	92
8417	JAÉN	37.78	-3.80	580

8419	GRANADA/AEROPUERTO	37.18	-3.78	570
8430	MURCIA	38.00	-1.17	62
8452	CÁDIZ/OBSERVATORIO	36.50	-6.27	8
8482	MALAGA/AEROPUERTO	36.67	-4.48	7
8487	ALMERÍA/AEROPUERTO	36.85	-2.38	21
60338	MELILLA/AEROPUERTO	35.28	-2.95	55

Anexo III:
Figuras del capítulo 5

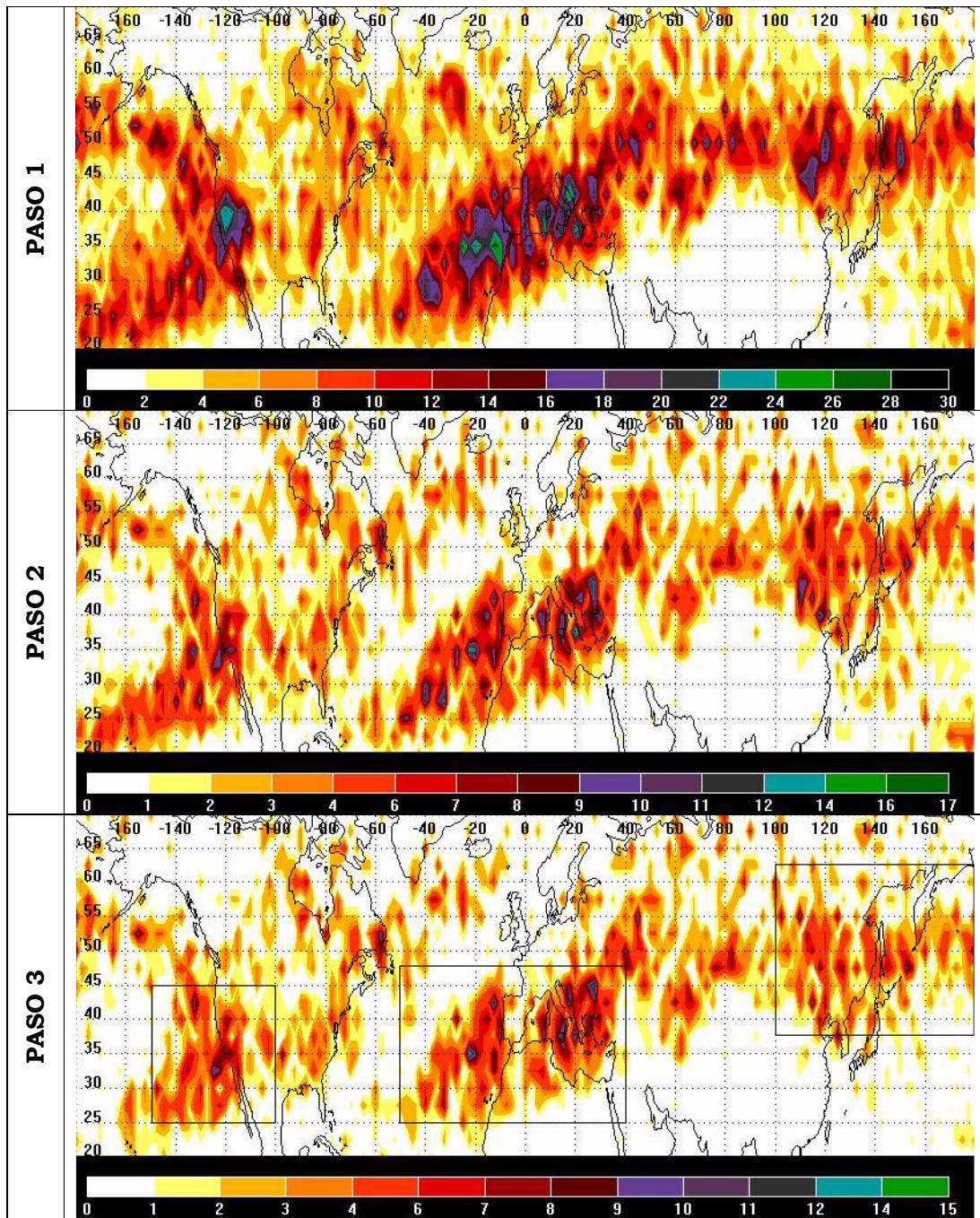


Figura III.1: Densidad de DANAs (número de DANAs/ 10^5 km 2) por punto de rejilla ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) para el periodo completo de estudio (1958-1998) y para los tres pasos utilizados en la identificación de las DANAs.

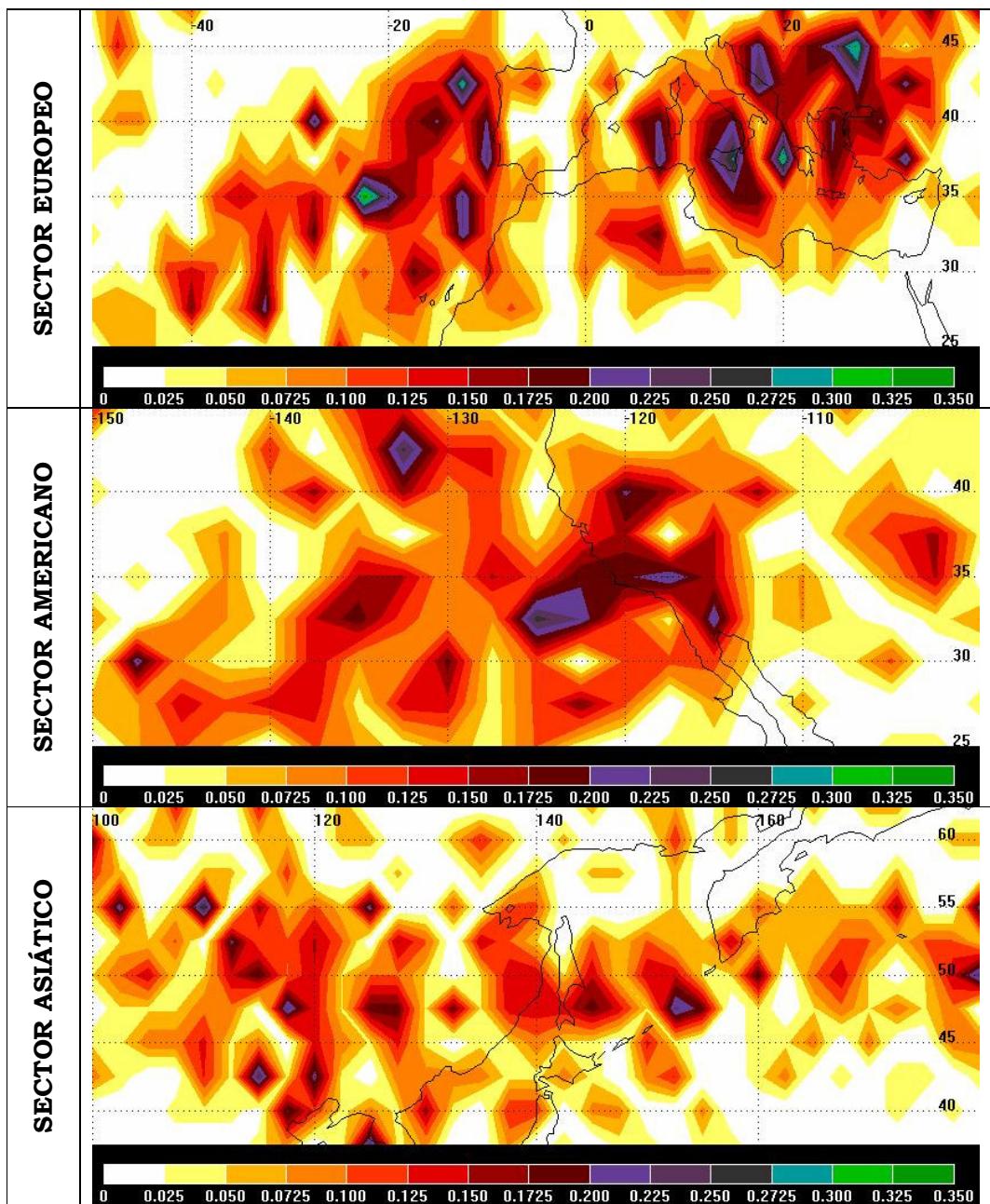
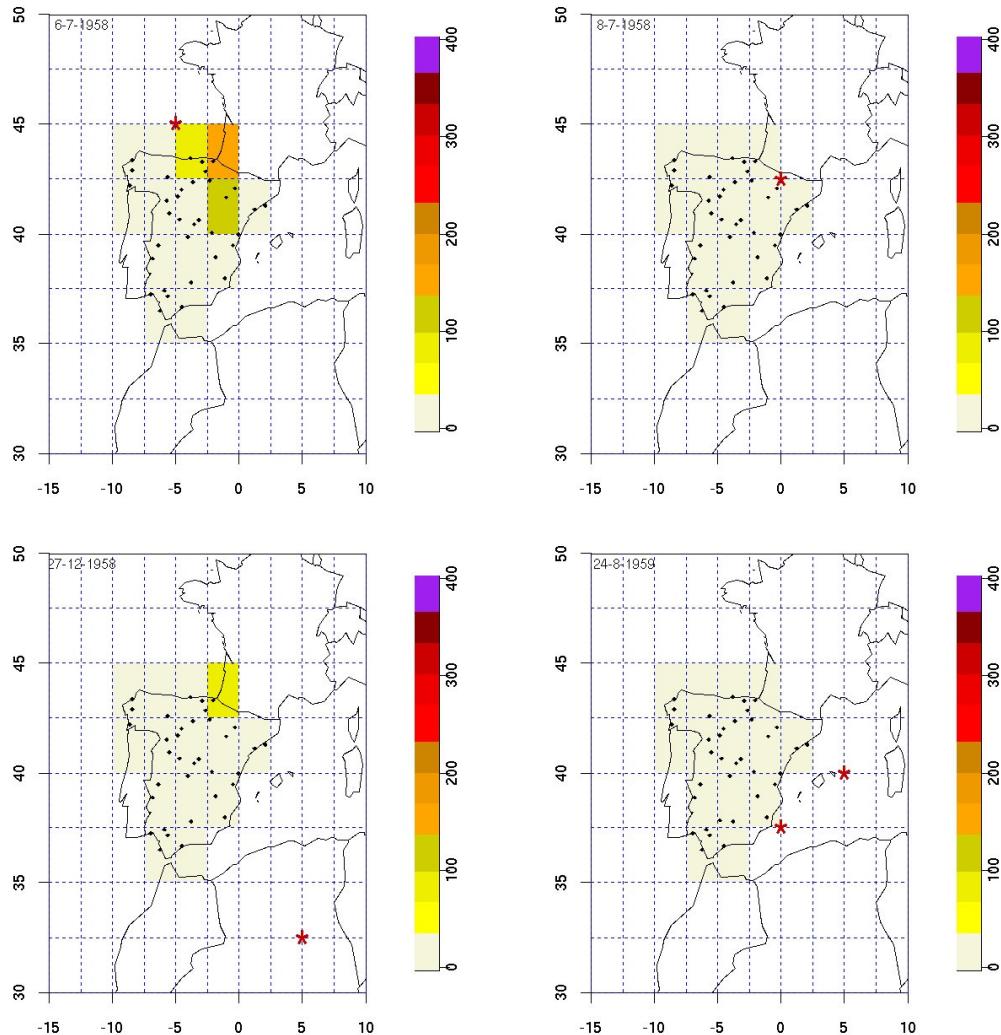
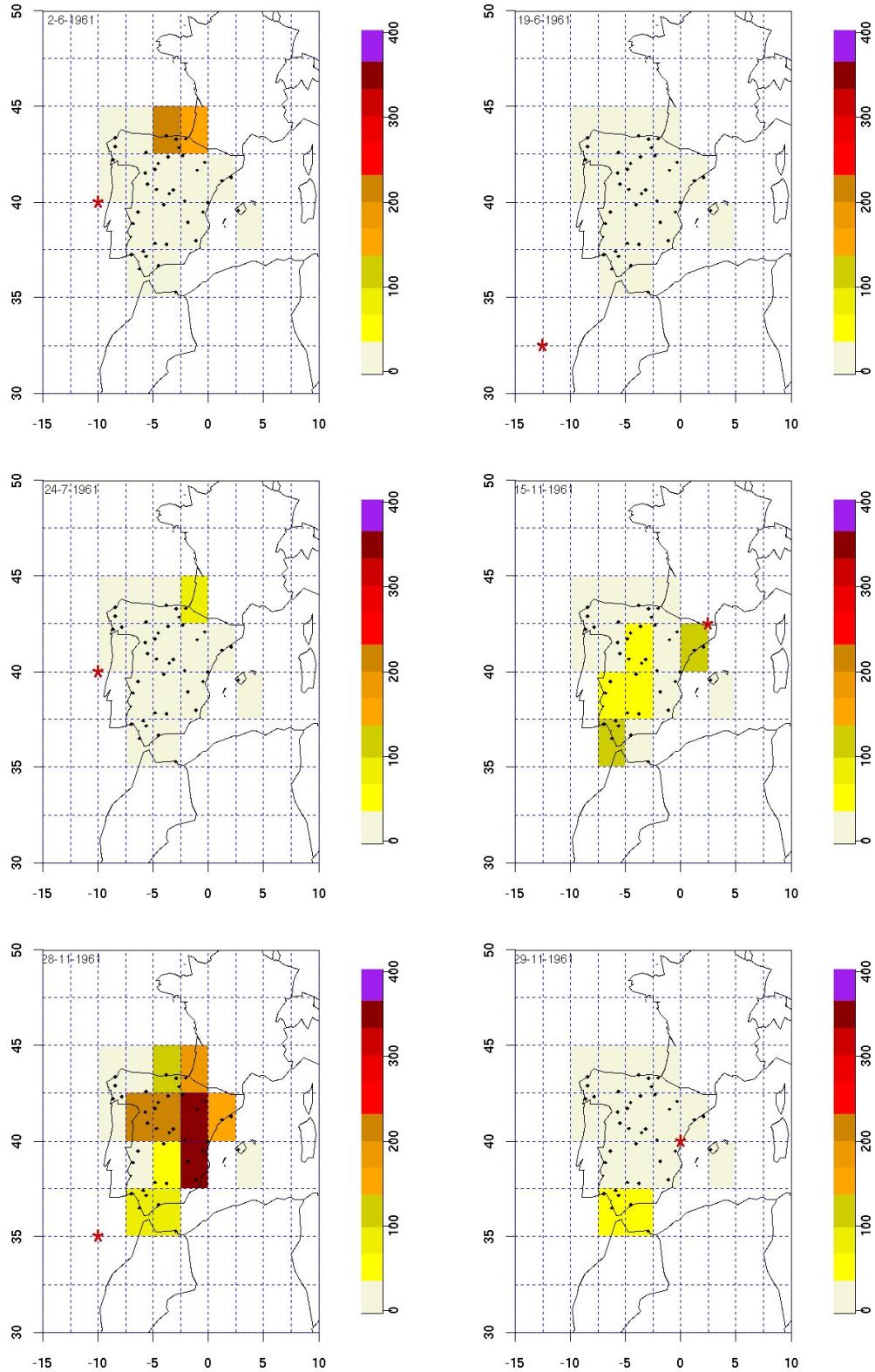


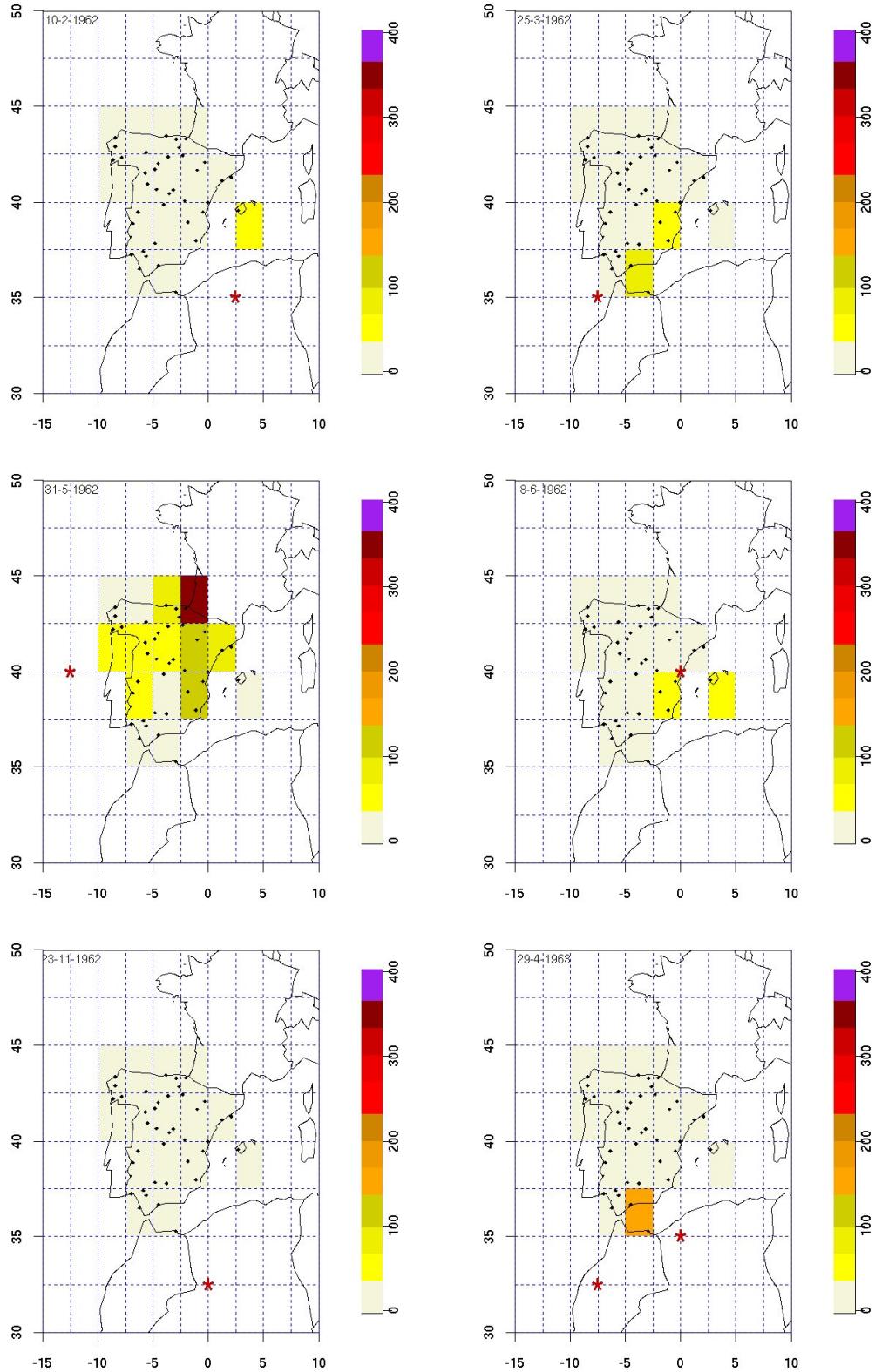
Figura III.2: Densidad de DANAs por año para el paso 3 (número de DANAs/ 10^5 año*km 2) por punto de rejilla ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) para todo el periodo de 1958-1998 para las tres áreas de mayor ocurrencia.

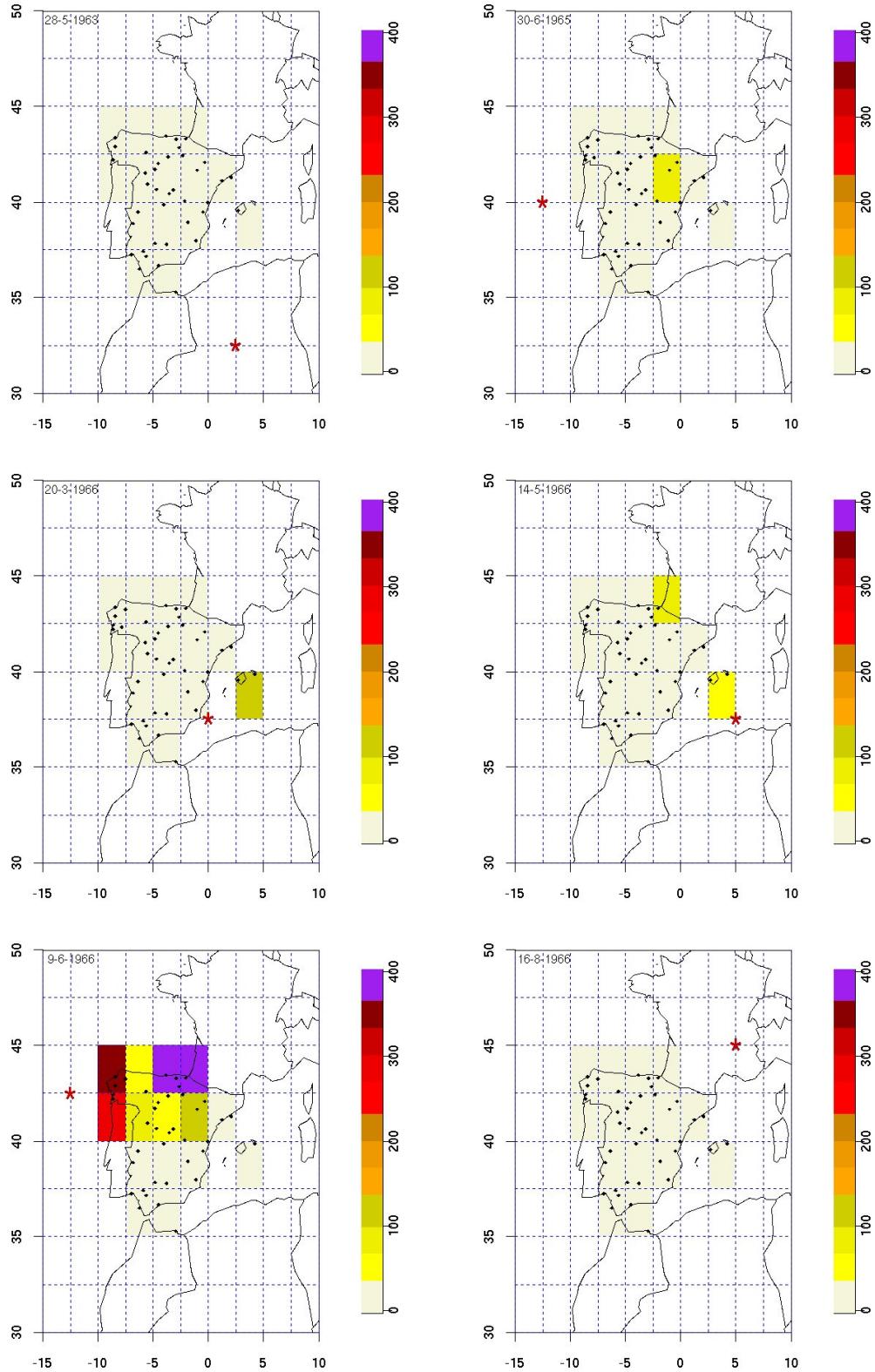
Anexo IV:
Figuras del capítulo 6

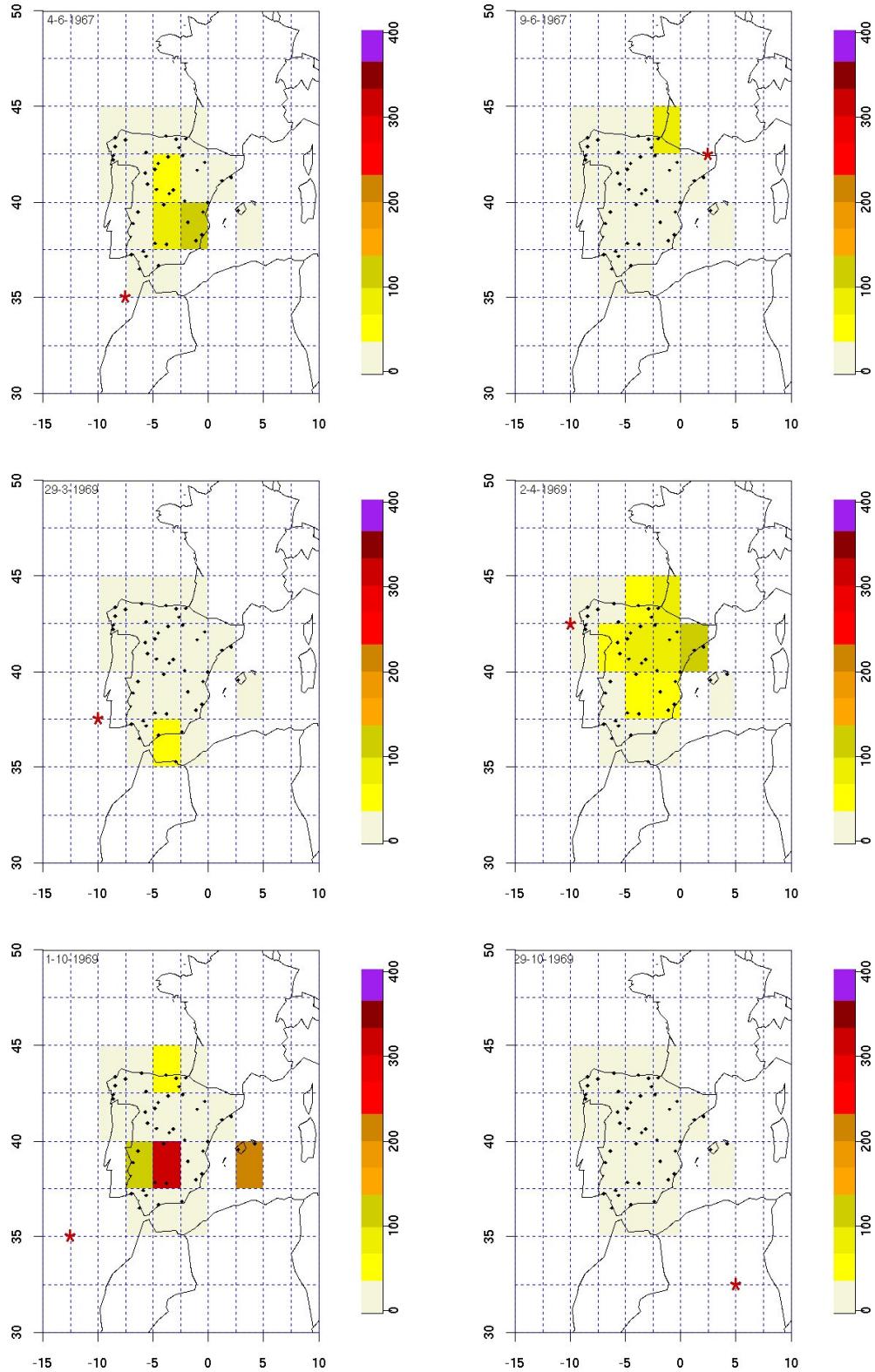
Figuras IV.1: Precipitación acumulada en 1/m² para cada DANAs situada en la región de la Península Ibérica. La posición de las DANAs están marcadas por un asterisco de color rojo. En la esquina superior izquierda aparece la fecha de ocurrencia del sistema.

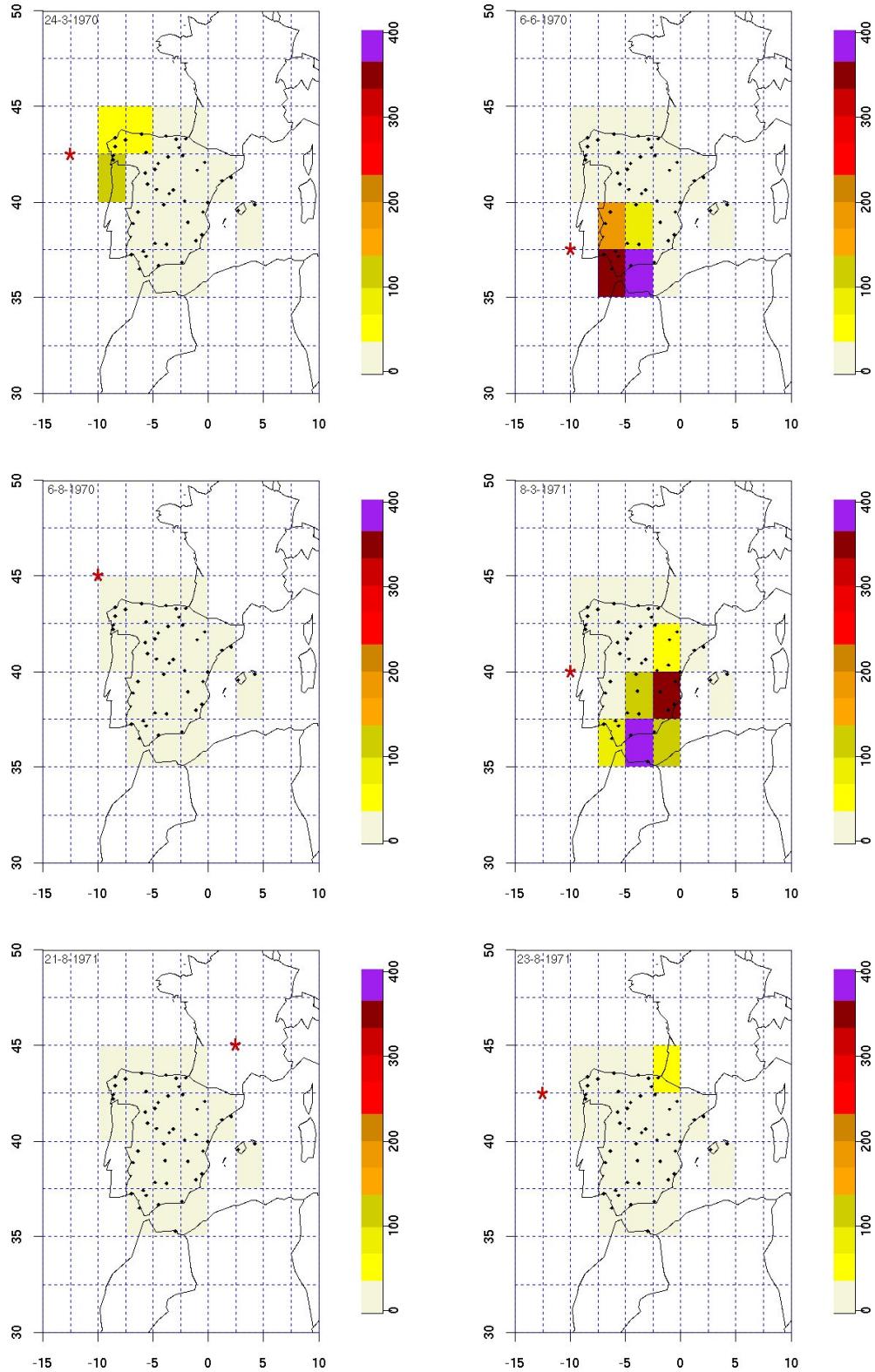


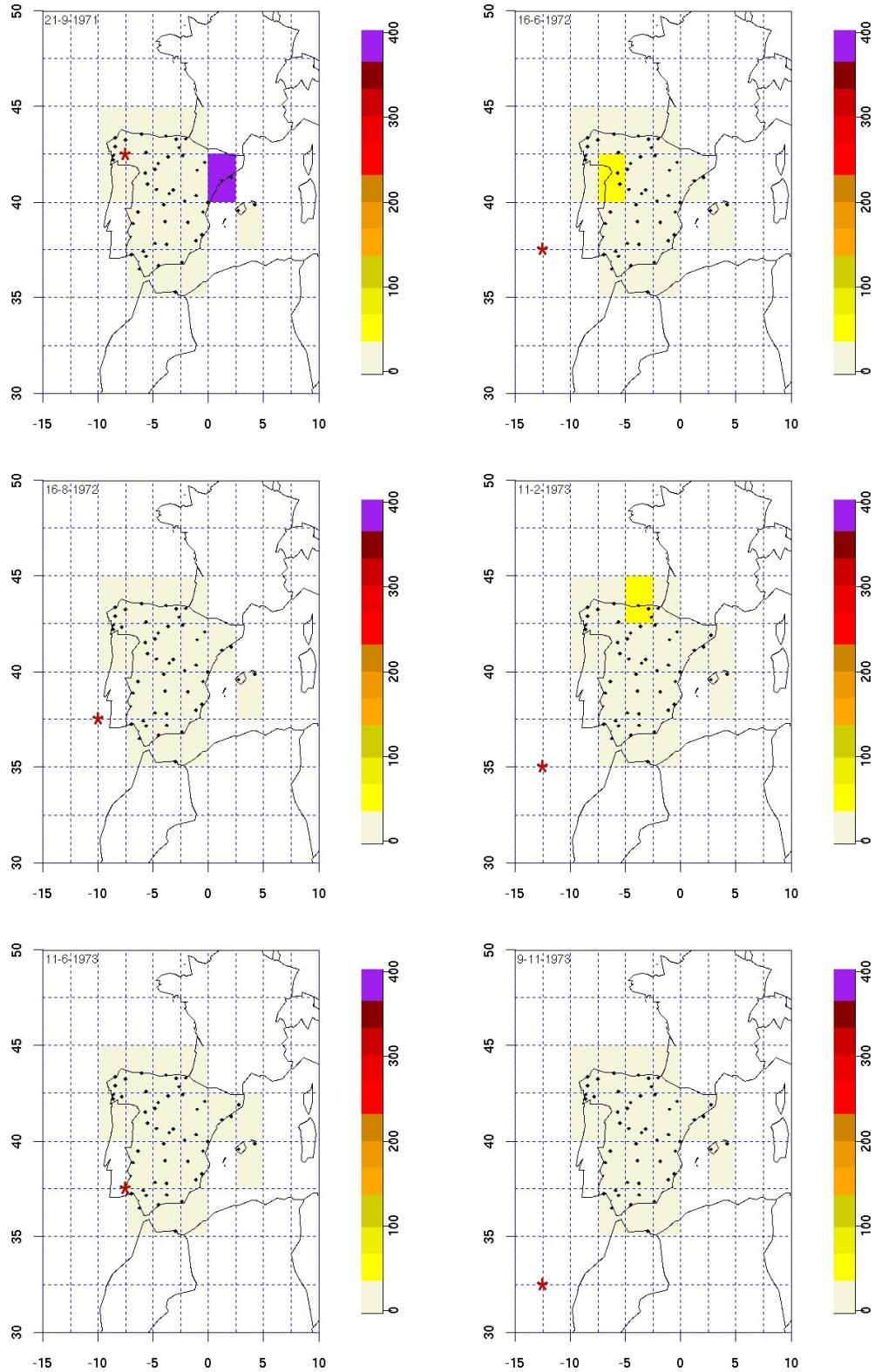


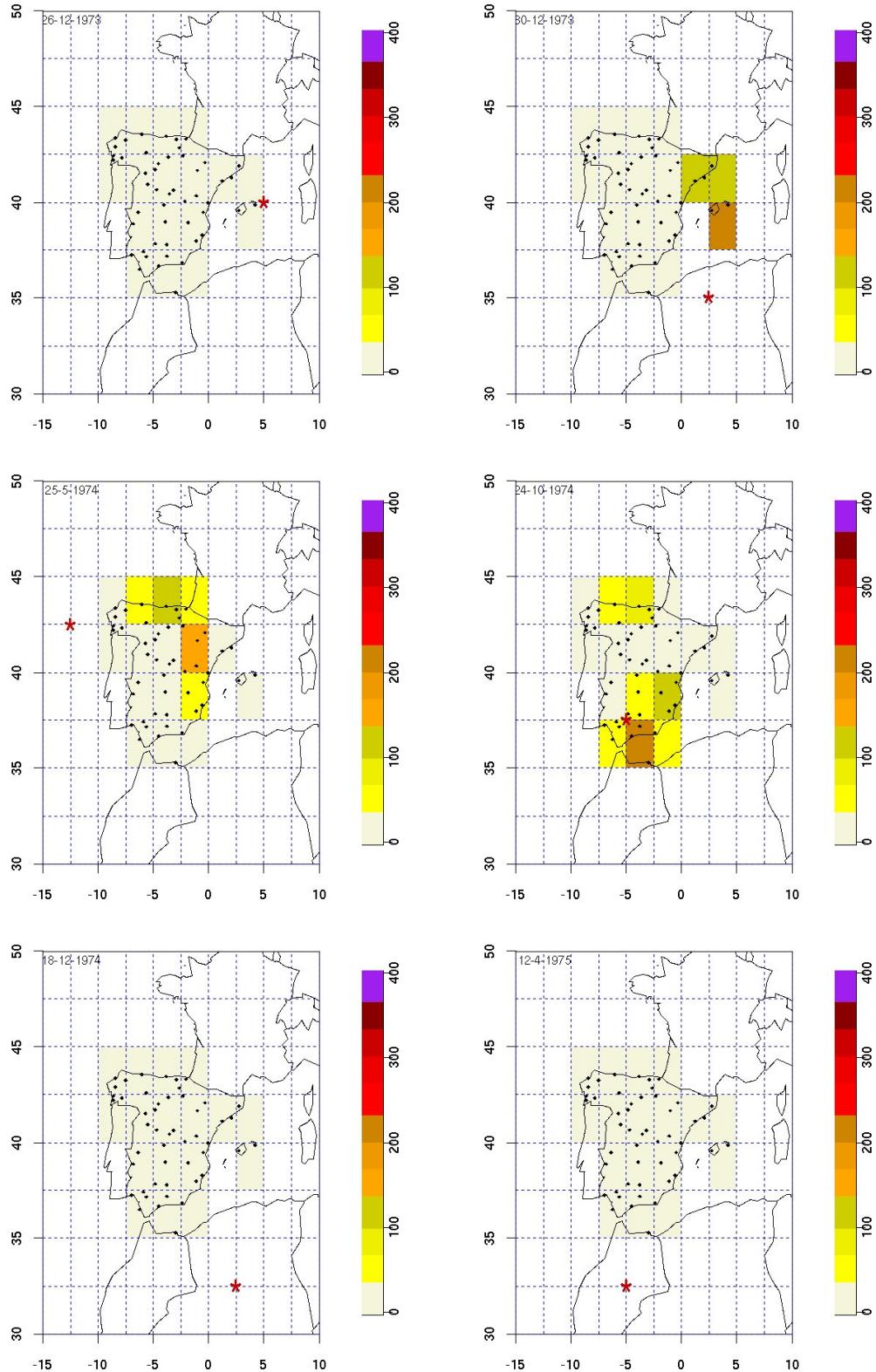


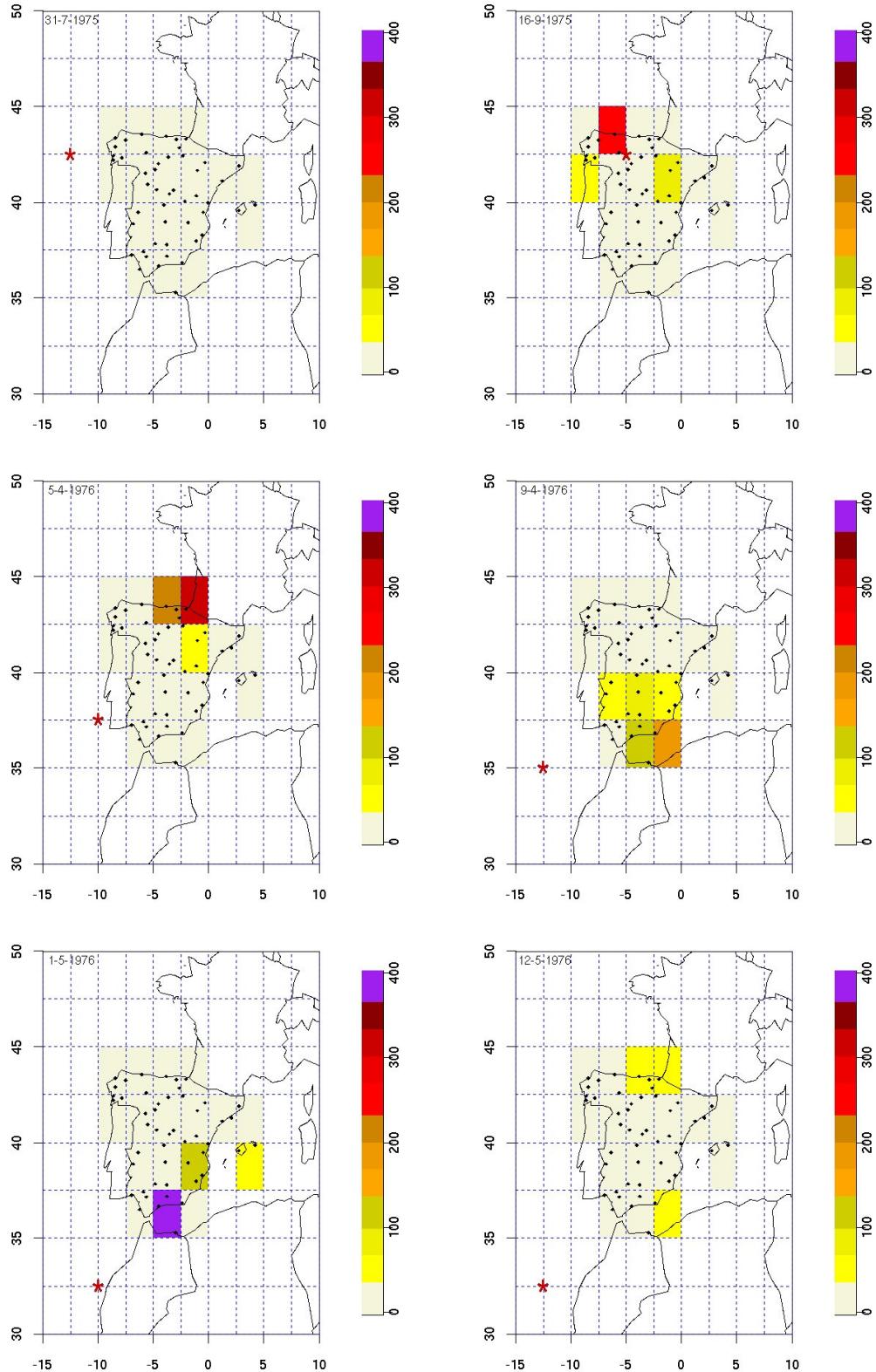


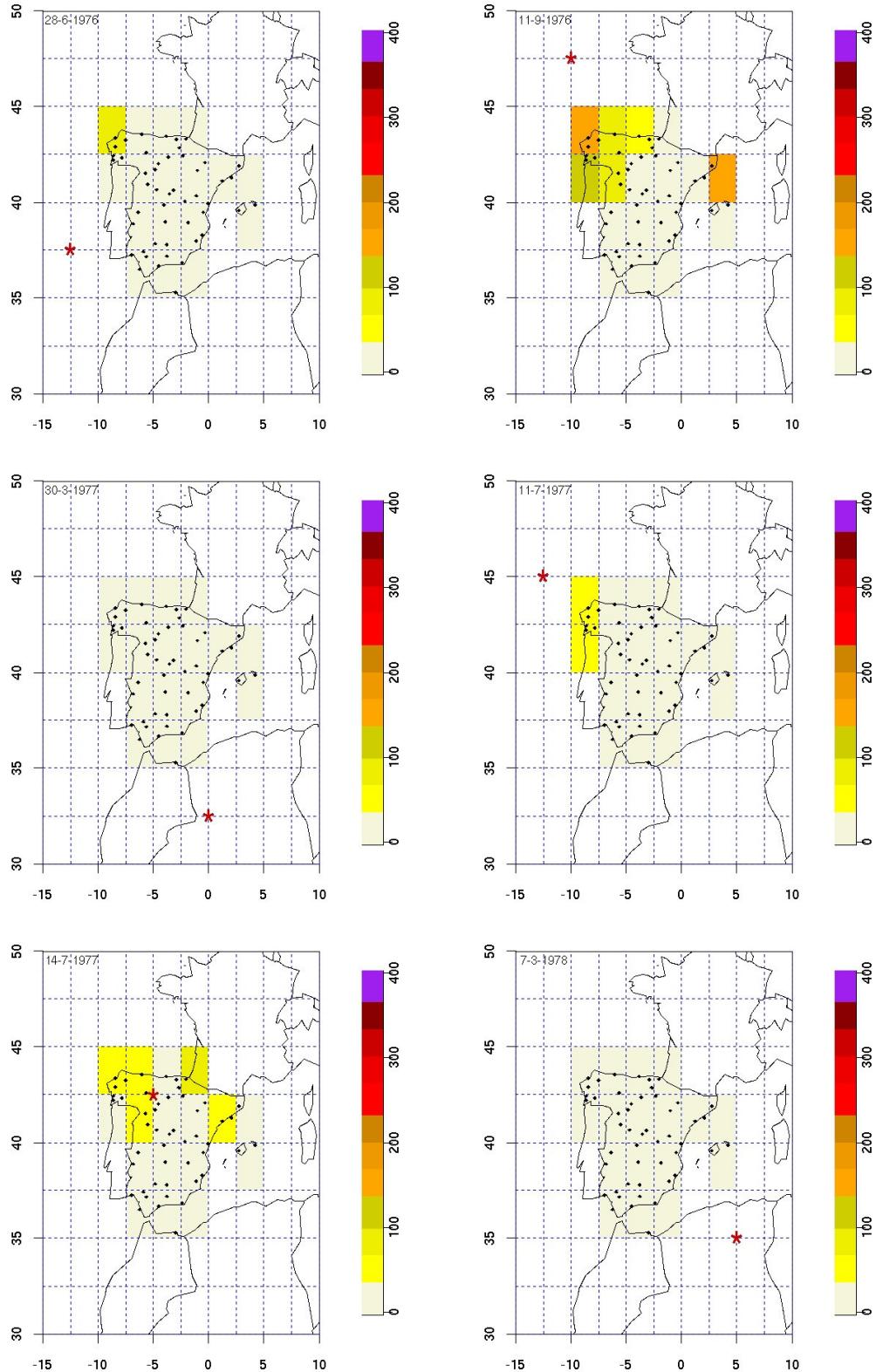


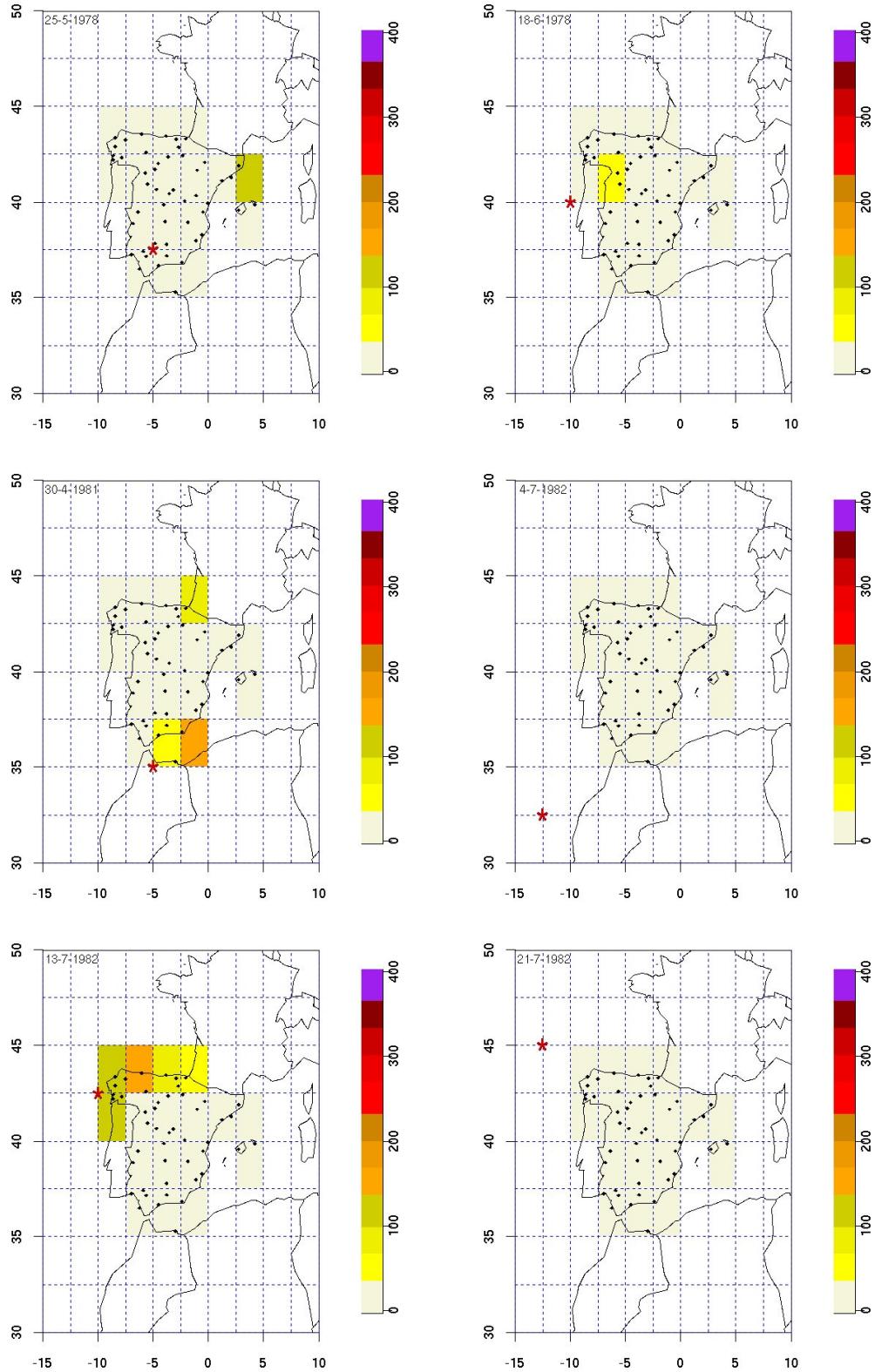


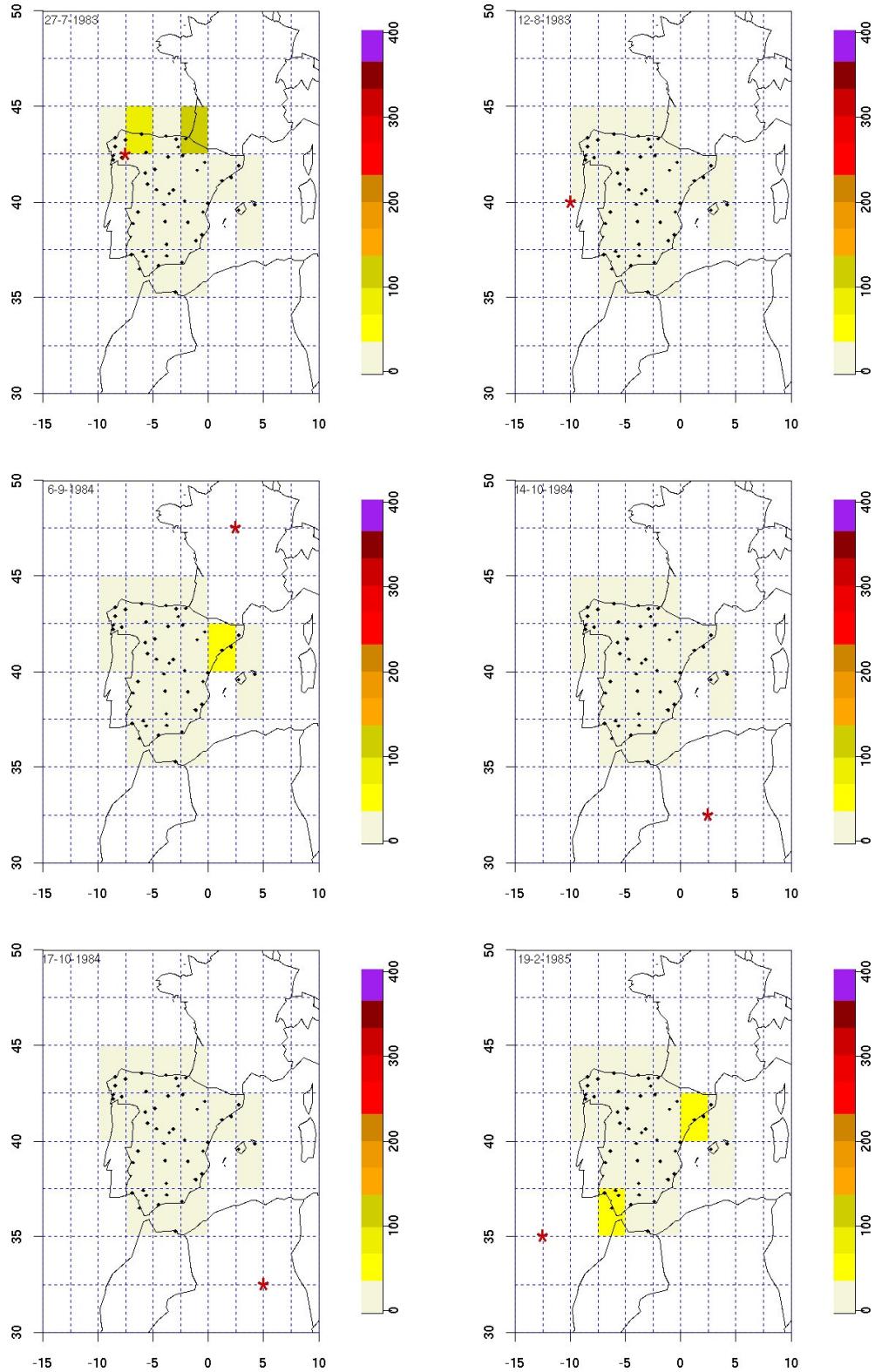


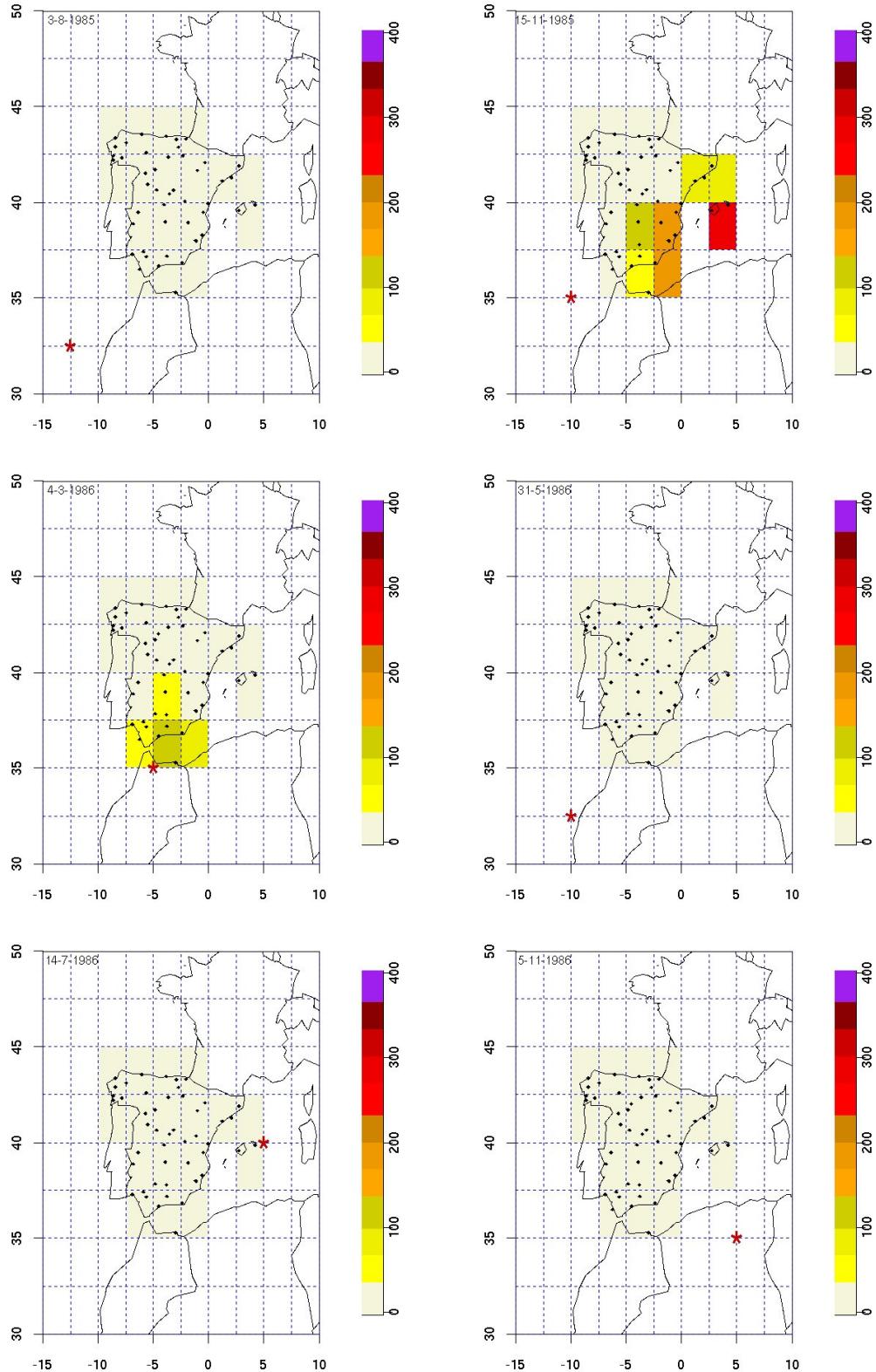


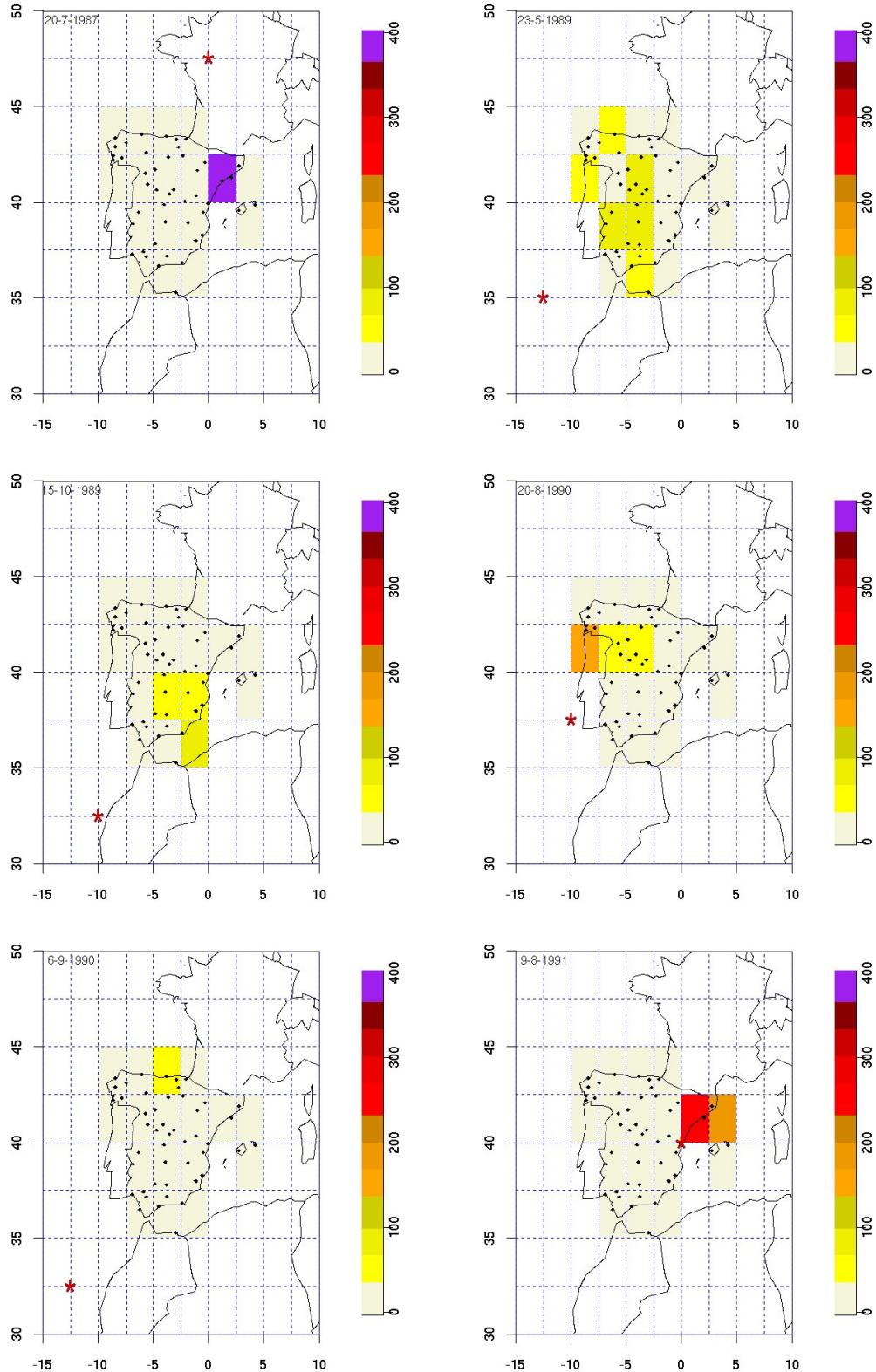


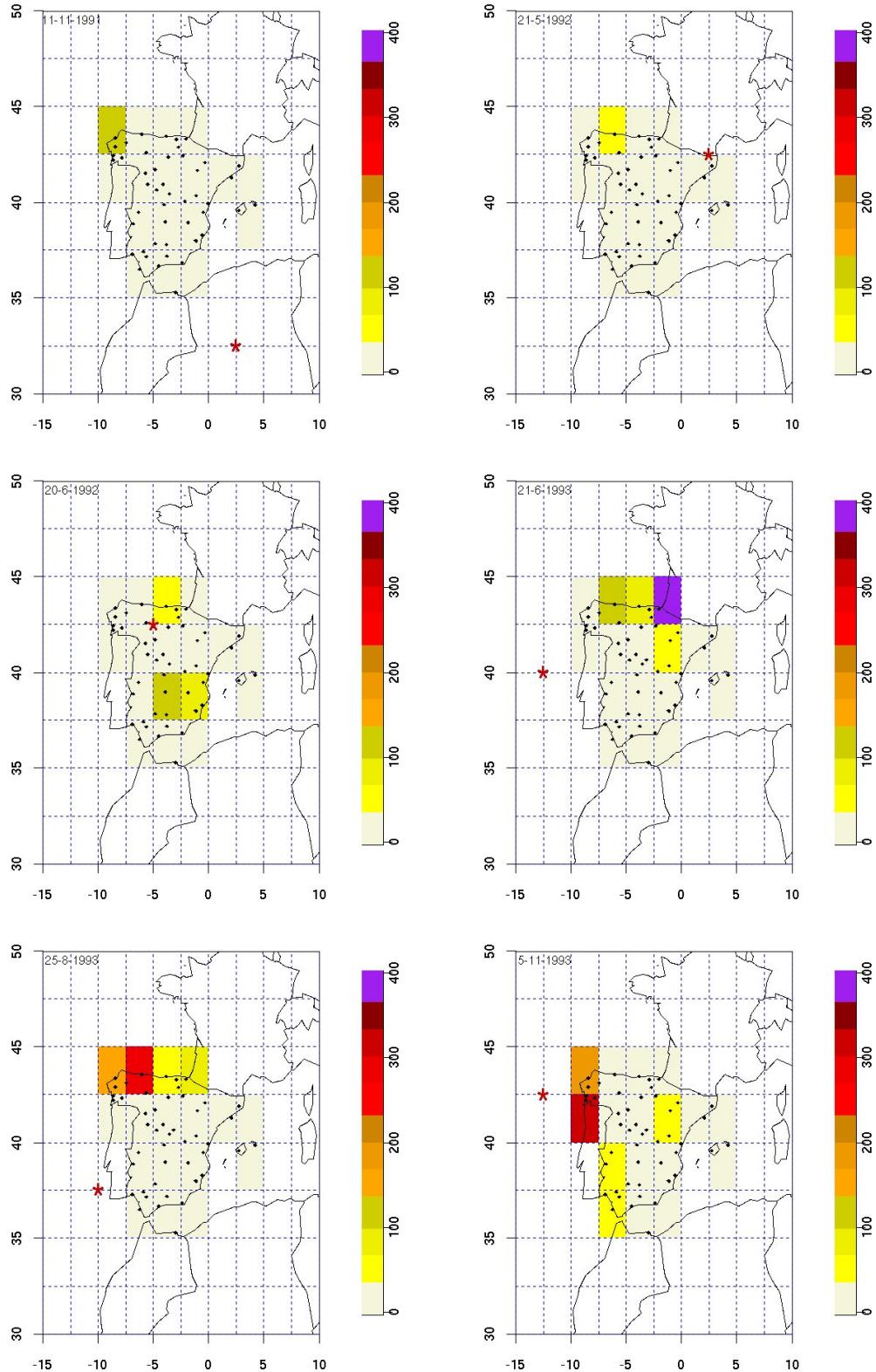


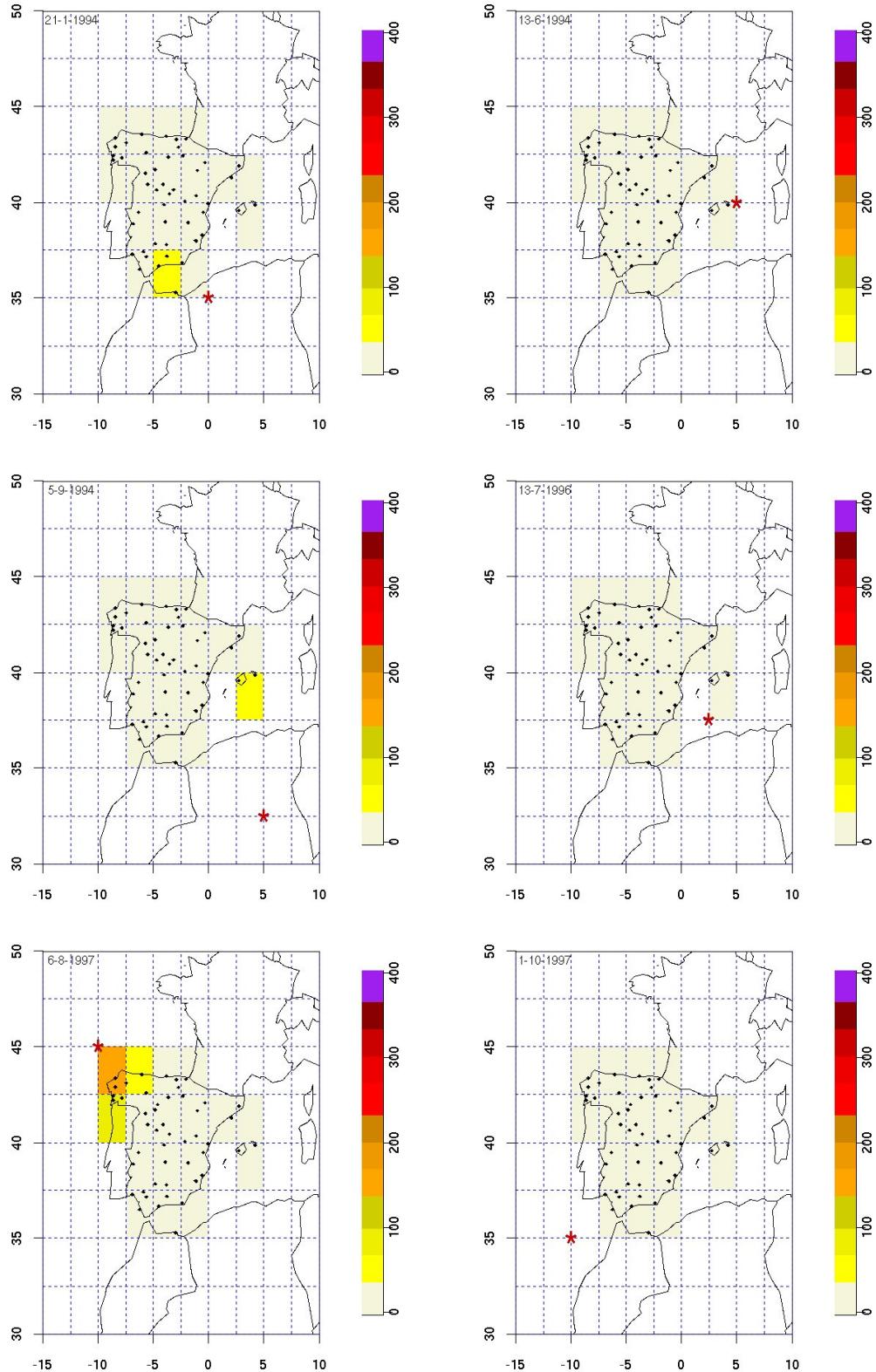


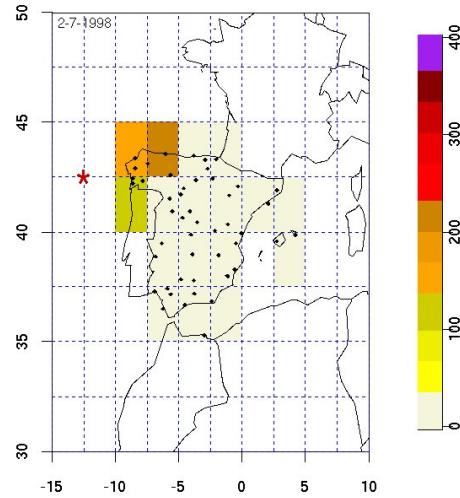
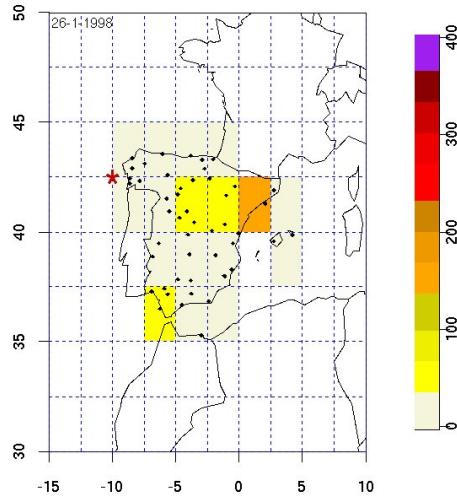












Figuras IV.2: Cubierta nubosa (en octas) para cada DANAs localizada en la región de la Península Ibérica. La posición de las DANAs están marcadas por un asterisco de color negro. En la esquina superior izquierda aparece la fecha de ocurrencia del sistema.

