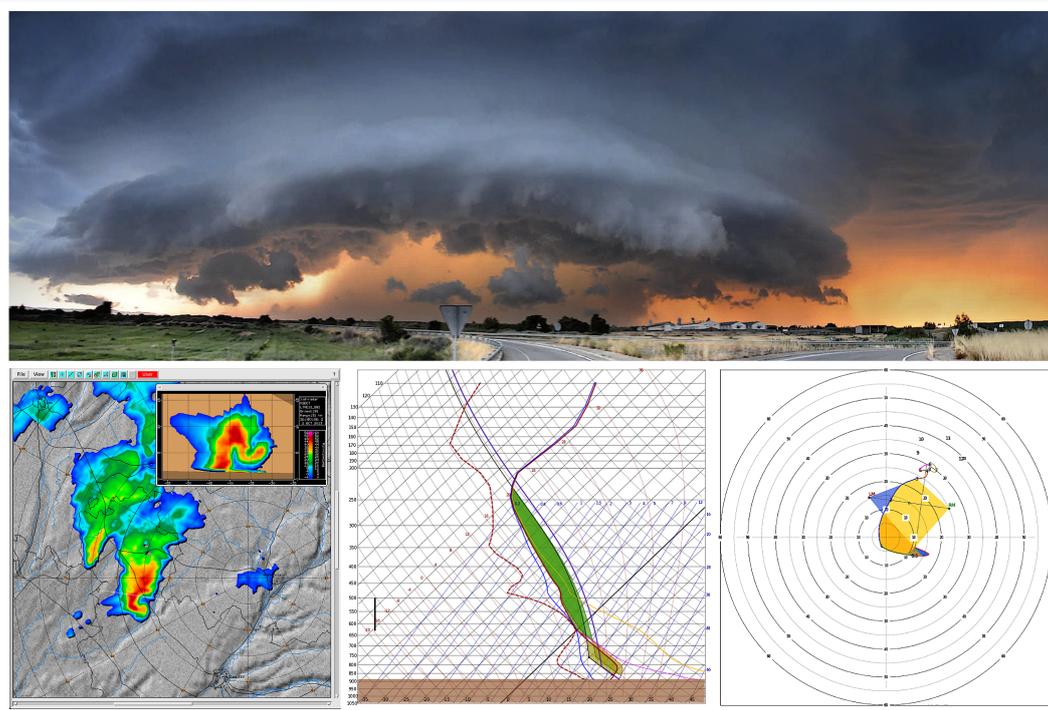


# Caracterización del ambiente convectivo en la formación de supercélulas en España en el periodo 2017–2021



Estudio basado en índices dinámicos y termodinámicos obtenidos a partir de salidas del modelo HARMONIE-AROME

## Nota técnica 38 de AEMET

José Antonio Quirantes ([josequirantes@yahoo.es](mailto:josequirantes@yahoo.es))

Francisco Javier Bello-Millán ([fbellom@aemet.es](mailto:fbellom@aemet.es))

Miguel Cívica ([mcivicac@aemet.es](mailto:mcivicac@aemet.es))

Julián Palacios García ([jpalaciosg@aemet.es](mailto:jpalaciosg@aemet.es))



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Foto de portada: supercélula HP, Sariñena (Huesca), 29 de junio de 2022 ©Miguel Cívica.

**Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico  
Agencia Estatal de Meteorología  
Madrid, 2022

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:  
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-22-010-9  
<https://doi.org/10.31978/666-22-010-9>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)  
C/ Leonardo Prieto Castro, 8  
28040 Madrid  
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet\_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

# Lista de símbolos y acrónimos

A	Supercélula anticiclónica	MUCAPE	<i>Most Unstable CAPE</i> : CAPE máxima de entre todas las burbujas cuyas alturas de partida son inferiores a la correspondiente al nivel de 350 hPa (ec. 2.2)
$\alpha$	Nivel de significación estadística		
B	Supercélula ciclónica		
BRN	<i>Bulk Richardson Number</i> : número de Richardson global (ec. 2.9)	MUCIN	<i>Most Unstable CIN</i> : CIN de la burbuja MU asociada a la MUCAPE (ec. 2.4)
BWER	<i>Bounded Weak Echo Region</i> : zona de eco débil acotada	NCA	Nivel de condensación por ascenso
$c$	Velocidad de propagación de la supercélula	NCC	Nivel de condensación convectiva
CAPE	<i>Convective Available Potential Energy</i> : energía potencial convectiva disponible (ec. 2.1)	NCL	Nivel de convección libre
CIN	<i>Convective INhibition</i> : energía de inhibición convectiva	NE	Nivel de equilibrio
CIZ	Cizalladura vertical del viento (ec. 2.5)	$\Phi$	Rumbo de las supercélulas
CIZE	Cizalladura efectiva	$\phi$	Ángulo que forma el vector velocidad con la componente zonal de la velocidad en cada punto
$D$	Factor de la ecuación de Bunkers (ec. 3.1)	$\rho$	Coefficiente de correlación lineal
EHI	<i>Energy-Helicity Index</i> : índice de energía-helicidad	$\mathbf{S}$	Vector cizalladura vertical media
ESRH	<i>Effective Storm Relative Helicity</i> : helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva (ec. 2.8)	SCP	<i>Supercell Composite Parameter</i> : parámetro compuesto de supercélulas (ec. 2.12)
$g$	Módulo de la aceleración de la gravedad	SRH	<i>Storm Relative Helicity</i> : helicidad relativa a la tormenta (ec. 2.6)
$\Delta H^{\text{ef}}$	Espesor de la capa efectiva	STP	<i>Significant Tornado Parameter</i> : parámetro significativo de tornados (ec. 2.13)
IQR	<i>InterQuartile Range</i> : rango intercuartílico, correspondiente al rango entre los percentiles 25 y 75	$T$	Temperatura
MLCAPE	<i>Mixed Layer CAPE</i> : CAPE de una burbuja que parte desde el suelo y cuyas propiedades termodinámicas corresponden a las de una capa de mezcla de cierto espesor (ec. 2.1)	$\bar{T}_v$	Temperatura virtual del entorno
MLCIN	<i>Mixed Layer CIN</i> : CIN de una burbuja que parte desde el suelo cuyas propiedades termodinámicas corresponden a las de una capa de mezcla de cierto espesor (ec. 2.3)	$T_v$	Temperatura virtual
MLLCL	<i>Mixed Layer Lifting Condensation Level</i> : nivel de condensación por ascenso de una burbuja que parte desde el suelo cuyas propiedades termodinámicas corresponden a las de una capa de mezcla	$T'_v$	Diferencia entre la temperatura virtual de la burbuja ( $T_v$ ), y la del entorno ( $\bar{T}_v$ )
		$U$	Módulo de la diferencia entre las velocidades medias del viento en la capa 0 – 6 km y en la capa 0 – 500 m, ambas ponderadas con la densidad del aire
		$\mathbf{v}$	Velocidad horizontal del viento
		VGP	<i>Vorticity Generation Parameter</i> : parámetro de generación de vorticidad
		WER	<i>Weak Echo Region</i> : zona de eco débil

# CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE CONVECTIVO EN LA FORMACIÓN DE SUPERCÉLULAS EN ESPAÑA EN EL PERIODO 2017–2021

José Antonio Quirantes<sup>1</sup>, Francisco Javier Bello-Millán<sup>2</sup>, Miguel Cívica<sup>3</sup>, Julián Palacios<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Producción e Infraestructuras (Jub.)

<sup>2</sup>Área de Técnicas y Aplicaciones de Predicción, Dep. Producción, DPI

<sup>3</sup>EMAE G-2, Delegación Territorial de Cataluña

## Resumen

En el presente trabajo se lleva a cabo una caracterización del ambiente convectivo en la formación de supercélulas en España. Se analizan las distribuciones de ciertos parámetros dinámicos y termodinámicos obtenidos a partir de salidas del modelo HARMONIE-AROME v40h11, de 2.5 km de resolución horizontal, para 497 casos de convección supercelular registrados entre 2017 y 2021. La base de datos utilizada ha sido generada a partir del listado anual de supercélulas que desde 2011 viene realizándose de manera sistemática por aficionados y cazatormentas del foro de Meteored y constituye el primer estadio de un futuro registro climatológico de este tipo de fenómenos mesoescalares. Asimismo, del trabajo se derivan umbrales estadísticos de los principales parámetros convectivos (diversos tipos de CAPE, cizalladuras, helicidades relativas a la tormenta en distintas capas o parámetros compuestos típicos del estudio de supercélulas, entre otros) que pueden servir como indicadores para la vigilancia y el pronóstico a muy corto plazo de la posible formación de supercélulas. Por otro lado, se proporcionan también hodógrafas compuestas y una evaluación cuantitativa del método de Bunkers para predecir el movimiento de estas células convectivas.

## 1. Introducción

Las supercélulas, o tormentas supercelulares, son las estructuras más organizadas dentro del espectro convectivo recogido en las distintas clasificaciones, que abarca tormentas unicelulares, multicélulas y sistemas convectivos de mesoescala. Presentan una disposición interna muy compleja, organizada, modelizable y, hasta

cierto punto, predecible. La característica singular que distingue a las supercélulas de otros tipos de estructuras convectivas es la presencia de un mesociclón profundo y persistente en su seno [1]. La alta capacidad de estas estructuras para generar tiempo adverso<sup>1</sup> suele originar cuantiosas pérdidas económicas y, en ocasiones, también humanas.

La primera mención de este tipo de tormentas que se puede encontrar en la literatura se debe a Browning [3], que realiza un estudio de ciertas tormentas que se desvían hacia la derecha del viento en la troposfera media. Debido a su elevada incidencia en las grandes llanuras de los EE. UU., en particular en la zona conocida como Tornado Alley, las supercélulas han sido profundamente estudiadas en dicho país desde los años 60 del pasado siglo, tanto por organizaciones gubernamentales como por grupos de investigación de distintas universidades (en muchos casos con el apoyo de legiones de «cazatormentas»), y se ha dedicado gran cantidad de recursos a su investigación. Algunas campañas de interés de seguimiento y estudio de supercélulas son VORTEX-95 [4], VORTEX2 [5] o ANSWERS [6].

En Europa, las supercélulas han despertado un interés creciente en los últimos 15 años. Sus devastadores efectos en superficie copan la mayor parte de los estudios del European Severe Storm Laboratory (ESSL) presentados en las European Conferences on Severe Storms (ECSS). Otras organizaciones, como ESTOFEX (European Storm Forecast Experiment), TORRO (Tornado and Storm Research Organization) o SevereWeatherEurope, dedican cada vez más recursos al seguimiento y predicción de los eventos supercelulares. En España existen múltiples casos de estudio de situaciones supercelulares [7–17], pero hasta el año 2020 no se disponía de estudios sistemáticos de caracterización ni climatología alguna de este tipo de tormentas [18]. Sin embargo, entre los aficionados a los fenómenos meteorológicos adversos, los cazatormentas vienen haciendo un gran trabajo colaborativo de seguimiento y constatación de los casos ocurridos en nuestro país desde hace aproximadamente 15 años. Gracias a esa colaboración, en el foro de Meteored (<https://foro.tiempo.com/tiempo-severo-b89.0/>) se ha generado una base de datos con los eventos supercelulares registrados desde el año 2003, y de manera sistemática desde 2011, hasta el 2020. Se puede encontrar una descripción de ese trabajo colaborativo en Martín *et al.* [18], donde se describe la base de datos de supercélulas registradas y se lleva a cabo un análisis de la distribución espacial de supercélulas en España en el periodo 2014–2019.

El primer trabajo que ofrece una extensa climatología de referencia de parámetros para pronóstico de supercélulas a partir de sondeos observados es obra de Rasmussen y Blanchard [19]. En este estudio se examinan más de 6000 sondeos de las 0 UTC en EE. UU. durante el año 1992 y son clasificados en función del tipo de convección al que dio lugar la situación: tormentas ordinarias no supercelulares, supercélulas sin tornados significativos y supercélulas con tornados significativos.

---

<sup>1</sup>El tiempo adverso asociado a tormentas locales puede venir caracterizado por precipitación en forma de granizo de tamaño mayor que 2.5 cm, la formación de tornados, rachas de viento con velocidades superiores a aproximadamente 100 km h<sup>-1</sup> o inundaciones repentinas [2].

De su análisis de distintos parámetros como la cizalladura en 0–6 km ( $CIZ_{0-6\text{ km}}$ ), la helicidad relativa a la tormenta en la capa 0–3 km ( $SRH_{0-3\text{ km}}$ ), o la energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés), concluyen que estos discriminan débilmente entre los entornos de los tres tipos convectivos mencionados. En cambio, parámetros combinados como el índice de energía-helicidad (EHI) o el parámetro de generación de vorticidad (VGP) permiten discriminar entre entornos de una manera más significativa. Además, la  $CIZ_{0-6\text{ km}}$  tiene valor para distinguir entre las distribuciones de supercélulas con y sin tornados significativos, y las asociadas a tormentas ordinarias no supercelulares.

Otro trabajo que hace uso de sondeos observados para estudiar las características de supercélulas es el llevado a cabo por Gómez [20], en el que se realiza un estudio de los parámetros termodinámicos y cinemáticos asociados a sondeos próximos a 25 supercélulas en la península ibérica entre 2001 y 2007. Se emplearon los sondeos observados de las 0 y 12 UTC más próximos a las supercélulas consideradas y se trató de ajustar el ambiente asociado a la supercélula. Para ello, se modificaron los datos de temperatura y punto de rocío del sondeo con los datos de esas variables obtenidos de los informes SYNOP del observatorio más próximo al lugar de inicio de la supercélula. Según la autora del trabajo, los parámetros convectivos obtenidos para las supercélulas estudiadas encajarían en los criterios establecidos por Rasmussen y Blanchard [19] para la formación de supercélulas.

Los dos trabajos anteriores, basados en sondeos observados, presentan problemas para una diagnosis correcta de los entornos favorables a la formación de supercélulas. Se debe plantear la cuestión no baladí de qué escalas de tiempo y espacio son las más apropiadas para describir el ambiente en el que se desarrolla la tormenta y, por tanto, qué definición de sondeo de proximidad sería la adecuada (respecto a discusiones sobre la definición de sondeo de proximidad véase, por ejemplo, [19, 21, 22]). Tal y como mencionan Thompson *et al.* [23], simulaciones numéricas llevadas a cabo por Weisman *et al.* [24] demostraron que las supercélulas pueden influir en la cizalladura en niveles bajos y en la flotabilidad hasta 30 km de distancia de la tormenta, modificando el ambiente anterior.

El primer estudio relevante con sondeos obtenidos de modelos numéricos fue llevado a cabo por Thompson *et al.* [23]. En este trabajo se examina una muestra de 413 sondeos en las proximidades de supercélulas tornádicas y no tornádicas. Los sondeos se obtuvieron a partir de análisis horarios del modelo Rapid Update Cycle-2 (RUC-2) de 40 km de resolución horizontal. Los sondeos tendían a ser demasiado fríos y secos en las capas próximas a la superficie en comparación con los sondeos observados y se producían, por tanto, subestimaciones de la CAPE. La modificación de los sondeos de proximidad con observaciones de la superficie cercana contrarrestaba los sesgos del análisis RUC-2 en el suelo, si bien en los resultados del trabajo no se llevó a cabo. Los parámetros termodinámicos y de cizalladura vertical del viento derivados de los sondeos de proximidad RUC-2 se evaluaron en una muestra estratificada en supercélulas significativamente tornádicas, supercélulas débilmente tornádicas, supercélulas no tornádicas, tormentas marginalmente

supercelulares<sup>2</sup> y tormentas no supercelulares. Comparando con los resultados de estudios anteriores de sondeos observados de proximidad, los sondeos obtenidos a partir de RUC-2 reforzaron los hallazgos previos de que la cizalladura vertical y la humedad en 0 – 1 km son buenos discriminadores entre supercélulas no tornádicas y supercélulas que producen tornados con intensidad F2 o mayor en la escala de Fujita [25].

Tradicionalmente, se han empleado niveles fijos arbitrarios tanto para caracterizar la organización de la convección como el ambiente de formación de supercélulas, como son los niveles de 0 y 6 km para el cálculo de la cizalladura o la capa 0 – 3 km para obtener helicidad relativa a la tormenta (SRH). En un intento de refinar las estimaciones del flujo que realmente alimenta la tormenta, Thompson *et al.* [26] definieron la «capa efectiva» como aquella región de la troposfera con cierta inestabilidad estática y poca energía de inhibición convectiva (CIN). Podría ser, por tanto, representativa del flujo de entrada a la supercélula. En su estudio concluyen que la helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva (ESRH) discrimina mejor entre supercélulas tornádicas y no tornádicas que la  $SRH_{0-1\text{ km}}$  o la  $SRH_{0-3\text{ km}}$ . Por otro lado, la ESRH es más representativa de la vorticidad del flujo de entrada en casos de convección elevada al no considerar capas que difícilmente se integrarán en la corriente ascendente [26, 27]. De forma similar a lo anteriormente expuesto, aunque la variable  $CIZ_{0-6\text{ km}}$  se ha utilizado tradicionalmente para distinguir entre tipos de convección organizada [28], Thompson *et al.* [29] definieron la cizalladura efectiva global (CIZE), basada en el espesor vertical de la tormenta y que permite un tratamiento homogéneo de la convección elevada y la convección con raíz en superficie.

En el trabajo que aquí se presenta se ha llevado a cabo una descripción cuantitativa del ambiente convectivo propicio para la formación de supercélulas en España basada en los parámetros dinámicos y termodinámicos calculados a partir de salidas del modelo HARMONIE-AROME v40h11 [30] operativo en AEMET entre 2017 y 2021, ambos inclusive. En la sección 2 se describe cómo se llevó a cabo el registro de las supercélulas consideradas en el estudio, así como los criterios que se tuvieron en cuenta para la creación de la base de datos posteriormente analizada. Además, se describen los distintos parámetros utilizados para la caracterización del ambiente convectivo. En la sección 3 se muestran los resultados del estudio y se comparan con otros disponibles en la literatura. Por último, en la sección 4 se presentan las conclusiones de este trabajo, así como posibles líneas futuras de investigación en este campo.

---

<sup>2</sup>Thompson *et al.* denominan *marginal supercell* a todas aquellas células con un máximo de cizalladura azimutal ciclónica menor que  $0.002\text{ s}^{-1}$ .

## 2. Metodología

El estudio se ha dividido en dos fases. Por un lado, se ha llevado a cabo una tarea de identificación y registro de supercélulas que ha permitido crear una base de datos con sus principales características. Por otro lado, se han generado sondeos a partir de salidas del modelo numérico HARMONIE-AROME v40h11 para calcular diferentes índices y parámetros de interés en el estudio del ambiente en su formación. En esta sección se describe el método de identificación de posibles supercélulas y se presentan los distintos criterios utilizados para el registro de estas en la base de datos. Además, se incluyen las definiciones de índices y parámetros empleados para analizar el ambiente convectivo y se justifica el criterio de selección de la pasada del modelo más representativa para caracterizar dicho ambiente.

### 2.1. Base de datos de supercélulas

La base de datos (en adelante, BD) está constituida por registros de supercélulas identificadas que cumplen con los criterios que se indican en esta subsección. La decisión de incluir una supercélula en la BD implica, indefectiblemente, la revisión de imágenes de una secuencia de ciclos de uno o varios radares para cada célula sospechosa. El sistema de observación radar de AEMET cuenta actualmente con 15 radares repartidos por todo el territorio nacional y cada uno de ellos genera un volumen polar de reflectividad con una cadencia de 10 minutos, lo que permite disponer de una adecuada resolución temporal para identificar los instantes de inicio y fin de cada supercélula. Las coordenadas correspondientes se determinan mediante las imágenes georreferenciadas de reflectividad de la primera elevación ( $0.5^\circ$ ), cuya resolución espacial es de 1 km. Otras características de la morfología tridimensional radar de las supercélulas, como contornos de reflectividad a distintas alturas y en distintos cortes verticales, se analizan a partir del volumen polar. La revisión de varios ciclos radar permite evaluar el giro del mesovórtice inmerso en la supercélula y clasificarla como anticiclónica (A) o ciclónica (B). Además, mediante la visualización de ciclos previos a la formación de la supercélula se puede evaluar a partir de qué modo convectivo pudo formarse (ver subsección 3.1). Aparte de las propiedades derivadas de la observación mediante radar, se han registrado efectos significativos de superficie, como precipitación en forma de granizo, rachas de viento de gran intensidad o presencia de tornados, en todos aquellos casos en los que ha habido información de retorno de campo o a través de instrumentos de medida.

#### 2.1.1. Criterios de identificación en el foro de Meteored

La base de datos del foro de Meteored, que incorpora casos de eventos supercelulares desde 2011 hasta 2020 de forma sistemática (lo cual supone una muestra de unas 1200 supercélulas), ha servido como punto de partida al presente estudio para la elaboración de la BD. En dicho foro, los criterios para la identificación de una tormenta como supercélula se dividían en dos tipos según su grado de aplicabilidad

y las supercélulas se clasificaban como presuntas o confirmadas en función de qué características de las mostradas en el Cuadro 2.1 se cumplían en cada caso. Para que una supercélula fuera considerada presunta, debían cumplirse el punto 2 y al menos dos de las características radar relacionadas en el punto 1. Por el contrario, una supercélula se consideraba confirmada cuando cumplía el punto 2, al menos cinco características radar del punto 1 y, además, el punto 3 o el punto 4 indistintamente.<sup>3</sup> El punto 5 no era necesario en ningún caso, ya que no siempre existía información de retorno, aunque resultaba conveniente.

### Cuadro 2.1: Criterios del foro de Meteored para el registro de supercélulas

1. Morfología de la célula radar.
  - 1.1. Estructura de niveles bajos en forma de gancho (no siempre se observa).
  - 1.2. Una única célula que persiste al menos 1 hora.
  - 1.3. Ecos de reflectividad mayores que 60 dBZ a lo largo de varios ciclos radar.
  - 1.4. Máxima reflectividad situada en niveles medios/altos (5 – 8 km).
  - 1.5. Zona de eco débil acotada (BWER, por sus siglas en inglés) en niveles medios/altos (5 – 8 km).
  - 1.6. Zona de eco débil sin acotar (WER) en niveles bajos.
  - 1.7. Estructura de los ecos de reflectividad en forma *V-notch*.
  - 1.8. *Echotops* por encima de 12 km (excepto en minisupercélulas).
2. Desvío respecto a las demás tormentas (propagación anómala).
3. Identificación del mesociclón en el viento *doppler* (no suele resultar posible).
4. Identificación visual directa, con fotografías, vídeo o *time-lapse*, que dé cuenta de la rotación de la tormenta (presencia de mesociclón).
5. Información de retorno de efectos adversos en superficie:
  - 5.1. Granizo de diámetro equivalente mayor que 2.5 cm.
  - 5.2. Presencia de tornado.
  - 5.3. Velocidades de viento mayores que 100 km h<sup>-1</sup>.
  - 5.4. Inundaciones repentinas.

#### 2.1.2. Criterios de identificación en la BD en este estudio

Aunque la base de datos del foro de Meteored incorpora casos de eventos supercelulares desde 2011, el estudio que aquí se presenta abarca el periodo entre 2017 y 2021 por motivos de disponibilidad de la versión del modelo numérico utilizado para la caracterización del ambiente en el inicio de la convección.

<sup>3</sup>La cobertura de viento *doppler* para detectar la presencia de mesociclón no siempre está garantizada, como se muestra en Quirantes *et al.* [12].

Debido a la dificultad histórica que entraña identificar un mesociclón en el viento *doppler* de la red de radares de AEMET [12], para construir la BD se han relajado los criterios expuestos en el Cuadro 2.1 puesto que se ha podido comprobar que algunas supercélulas confirmadas visualmente (mediante vídeos, fotos o *time-lapses*) o por información de retorno (casi todos los reportes de granizo de diámetro 5 cm o superior están asociados a supercélulas, así como la práctica totalidad de los tornados de categoría EF2 o superior [28, 31]) no cumplían muchos de los exigentes criterios iniciales del foro de Meteored. Por ejemplo, en algunas (pocas) ocasiones la desviación es poco apreciable debido a que el flujo rector es muy intenso. Respecto al umbral temporal, correspondiente al criterio 1.2 del Cuadro 2.1, también se ha identificado rotación en algunas de las células con duraciones inferiores a una hora. En cuanto al punto 1.3, las reflectividades superiores a 60 dBZ solo se suelen dar entre mayo y septiembre, y no todas llegan a superar dicho umbral. En invierno también se producen algunas supercélulas, preferentemente en zonas costeras mediterráneas, y sus reflectividades son muy inferiores, en el entorno de los 48 dBZ. Otros motivos por los que no se llega a dicho umbral son apantallamientos que alteran drásticamente los ecos reflejados, o que la célula esté muy alejada de los radares disponibles y los haces no capturen las zonas de máxima reflectividad. Esto provoca que resulte más adecuado comparar los ecos de la tormenta sospechosa con otras no supercelulares de su alrededor, ya que, generalmente, tendrá una reflectividad superior. Por último, los cortes verticales usados para detectar máximos de reflectividades y estructuras BWER no están disponibles en todos los casos.

Por todo ello, algunas de estas características no se usan para la identificación (viento *doppler*, BWER o reflectividad en niveles altos) y son aprovechadas solo como información adicional cuando es posible disponer de ellas, y se siguen los demás criterios, pero de forma más laxa: desviación respecto a las demás tormentas; altas reflectividades, especialmente en comparación con otras tormentas no supercelulares de las cercanías (si las hay); forma de gancho; *V-notch*; WER; *echotops* superiores a 12 km (excepto en minisupercélulas); duración, e información de retorno en forma de fotos, vídeos *time-lapse*, reportes de granizo de diámetro superior a 5 cm o tornado de categoría EF3 o superior. La información referente a altas velocidades del viento, granizo de tamaño inferior a 5 cm, o tornados de menor categoría es indicativa de un posible origen supercelular, pero no lo asegura.

Por lo tanto, en la depuración posterior del listado anual de Meteored para construir la BD no se ha distinguido entre supercélulas presuntas y confirmadas, sino que se ha realizado una revisión de todos los casos registrados y se ha decidido considerar como supercélulas identificadas aquellas tormentas que cumplían cualquiera de los dos criterios expuestos en el Cuadro 2.2.

### Cuadro 2.2: Criterios seguidos en este trabajo para el registro de supercélulas

1. Identificación del mesociclón: mediante el viento *doppler* o a través de una identificación visual directa, con fotografías, vídeo o *time-lapse*, que dé cuenta de la rotación de la tormenta.
2. Identificación indirecta: se han de cumplir todas las siguientes condiciones:
  - 2.1. Morfología de la célula radar:
    - 2.1.1. Una única célula que persiste al menos 1 hora.
    - 2.1.2. Ecos de reflectividad mayores que 60 dBZ en los meses de mayo a septiembre y que 48 dBZ el resto del año, a lo largo de varios ciclos radar, consecutivos o no.
    - 2.1.3. Zona de eco débil sin acotar (WER) en niveles bajos.
    - 2.1.4. Estructura de los ecos de reflectividad en forma *V-notch*.
    - 2.1.5. *Echotops* por encima de 12 km (excepto en minisupercélulas).
  - 2.2. Desvío respecto a las demás tormentas (propagación anómala).

Posteriormente, se llevó a cabo una depuración adicional para descartar situaciones en las que hubiese multiplicidad de supercélulas, de forma similar a lo expuesto en [23]. Si dos supercélulas se forman relativamente cerca tanto temporal como espacialmente, ambas estarán asociadas a un mismo ambiente de inicio de la convección y, por tanto, ciertos ambientes podrían estar sobrerrepresentados en el estudio estadístico. Las condiciones que se debían cumplir simultáneamente para determinar que existía duplicidad entre dos supercélulas de la BD son las que se muestran en el Cuadro 2.3. En los casos en que existe duplicidad, solamente se ha considerado la supercélula que posee mayor número de características del punto 1 del Cuadro 2.1.

### Cuadro 2.3: Criterios de duplicidad de supercélulas

1. Que a las dos se les asignase el mismo análisis, siguiendo el criterio de cercanía temporal expuesto en la subsección 2.3.
2. Que estuvieran separadas menos de 100 km.
3. Que las dos presentaran el mismo sentido de giro: ciclónico o anticiclónico.
4. Que no se hubiesen generado a partir de un *storm-splitting*.

## 2.2. Índices y parámetros para caracterización de la convección

Para cada supercélula registrada en la BD se obtuvieron distintos parámetros e índices mediante sondeos generados a partir de análisis del modelo HARMONIE-AROME v40h11 [32]. Se trata de un modelo no hidrostático de área limitada que actualmente se ejecuta en dos dominios: uno de ellos engloba la península ibérica y

las islas Baleares, mientras que el otro incluye el archipiélago canario y su entorno. La resolución horizontal del modelo es 2.5 km en espacio Lambert y, para cada caso de la BD, se considera el sondeo resultante de la interpolación bilineal al punto de inicio obtenido mediante imágenes de radar. En AEMET, en el periodo estudiado, se realizan ocho pasadas operativas diarias de HARMONIE-AROME, lo que permite que se disponga de análisis a las 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 y 21 UTC. La disponibilidad de esta versión del modelo desde marzo de 2017 propició que el estudio se haya restringido por ahora al periodo 2017–2021, aunque no se descarta ampliar dicho periodo a fechas anteriores a 2017 en un futuro.

A continuación se describen los parámetros e índices que se han utilizado en este trabajo. Aunque todos pueden resultar ampliamente conocidos en el estudio general de la convección, y en el caso concreto de la convección supercelular, se considera de interés exponer cuáles han sido las definiciones utilizadas para el cálculo de cada uno de ellos debido a las distintas versiones presentes en la literatura.

### 2.2.1. Energía potencial disponible para la convección (CAPE)

Para describir numéricamente la inestabilidad estática de la atmósfera, se han considerado dos CAPE distintas. En primer lugar, la MLCAPE (*Mixed Layer CAPE*) representa la CAPE de una burbuja que parte desde cerca de la superficie y cuyas propiedades termodinámicas corresponden a las de una capa de mezcla de un espesor determinado. Esto permite tener en cuenta en cierto modo el efecto de los intercambios de temperatura y humedad con el ambiente, que no suele considerarse en el ámbito de la teoría de la burbuja. Sin embargo, no existe un criterio universalmente aceptado para el valor concreto del espesor que debe adoptarse [33].<sup>4</sup> En este trabajo se ha optado por capas de 50 hPa de espesor, en línea con las recomendaciones del ESSL [39].

El cálculo de MLCAPE se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\text{MLCAPE} = g \int_{Z_{\text{NCL}}}^{Z_{\text{NE}}} \frac{T'_v}{\bar{T}_v} dz, \quad (2.1)$$

donde  $g$  es el módulo de la aceleración de la gravedad,  $Z_{\text{NCL}}$  es el nivel de convección libre,  $Z_{\text{NE}}$  es el nivel de equilibrio y  $T'_v = T_v - \bar{T}_v$  es la diferencia entre la temperatura virtual de la burbuja ( $T_v$ ), y la del entorno ( $\bar{T}_v$ ). Por otra parte, la MUCAPE (*Most Unstable CAPE*) representa la CAPE máxima de entre todas las burbujas cuyas alturas de partida son inferiores a la correspondiente al nivel de 350 hPa. El cálculo se lleva a cabo de forma similar a la ecuación 2.1, aunque tanto  $Z_{\text{NCL}}$  como  $Z_{\text{NE}}$  dependen del nivel de partida de la burbuja  $i$  estudiada,  $Z_0^i$ :

$$\text{MUCAPE} = \max_{Z_0^i \leq z_{350 \text{ hPa}}} \left( g \int_{Z_{\text{NCL}}^i}^{Z_{\text{NE}}^i} \frac{T'_v}{\bar{T}_v} dz \right). \quad (2.2)$$

<sup>4</sup>Bluestein y Jain [34] emplearon 500 m; Wakimoto y Wilson [35], 50 hPa; Johns *et al.* [36], 100 hPa, y tanto Rasmussen y Blanchard [4] como Weisman y Klemp [37, 38], 1000 m, por citar algunos casos.

### 2.2.2. Energía de inhibición de la convección (CIN)

De forma análoga a las CAPE, se han calculado dos CIN con las mismas características. La MLCIN (*Mixed Layer CIN*) representa la CIN de una burbuja que parte desde el suelo cuyas propiedades termodinámicas corresponden a las de una capa de mezcla de 50 hPa de espesor:

$$\text{MLCIN} = g \left| \int_{Z_0}^{Z_{\text{NCL}}} \frac{T'_v}{\bar{T}_v} dz \right|, \quad (2.3)$$

donde  $Z_0$  es el nivel de partida. Por otro lado, la MUCIN (*Most Unstable CIN*) representa la CIN de la burbuja MU asociada a la MUCAPE:

$$\text{MUCIN} = g \left| \int_{Z_0^{\text{MU}}}^{Z_{\text{NCL}}^{\text{MU}}} \frac{T'_v}{\bar{T}_v} dz \right|. \quad (2.4)$$

### 2.2.3. Cizalladura del viento

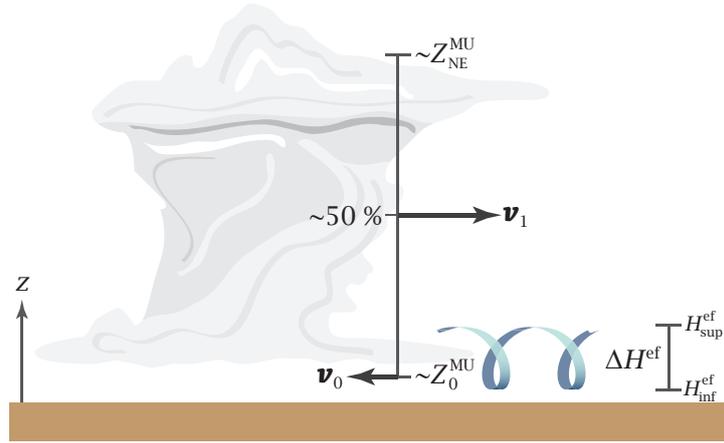
Generalmente se emplea la cizalladura vertical del viento como indicador de la organización de la convección. En este trabajo la cizalladura se define como el módulo de la diferencia vectorial de las velocidades horizontales del viento,  $\mathbf{v}$ , entre dos niveles verticales distintos  $h_a$  y  $h_b$  ( $\text{CIZ}_{h_a-h_b}$  o, simplemente,  $\text{CIZ}_{h_a h_b}$ ):

$$\text{CIZ}_{h_a-h_b} = |\mathbf{v}(h_b) - \mathbf{v}(h_a)|. \quad (2.5)$$

La utilidad de algunas cizalladuras basadas en niveles fijos ha quedado ampliamente contrastada (véase, por ejemplo, [23, 27, 28, 40]). En este estudio se han considerado  $\text{CIZ}_{0-1 \text{ km}}$  ( $\text{CIZ01}$ ), adecuada en el pronóstico de formación de tornados mesociclónicos;  $\text{CIZ}_{0-3 \text{ km}}$  ( $\text{CIZ03}$ ), que permite discriminar entre distintas intensidades de esta clase de tornados [41];  $\text{CIZ}_{0-6 \text{ km}}$  ( $\text{CIZ06}$ ), que tradicionalmente ha servido para caracterizar la organización de la convección, y  $\text{CIZ}_{0-8 \text{ km}}$  ( $\text{CIZ08}$ ), para identificar convección supercelular de larga duración correspondiente a 4 horas o más [40].

Aparte de las cizalladuras basadas en niveles fijos, existe un parámetro cuya definición concreta depende de la propia inestabilidad estática de la atmósfera: la cizalladura efectiva global (o simplemente cizalladura efectiva, CIZE) [29], que se basa en el nivel de partida de la burbuja más inestable ( $Z_0^{\text{MU}}$ ) y el nivel de equilibrio de su evolución ( $Z_{\text{NE}}^{\text{MU}}$ ). CIZE se define como el módulo de la diferencia vectorial entre (1) la velocidad de viento en el punto medio de  $Z_{\text{NE}}^{\text{MU}}$  y  $Z_0^{\text{MU}}$  y (2) la velocidad de viento en  $Z_0^{\text{MU}}$  (en la Figura 2.1 la cizalladura efectiva sería igual a  $\text{CIZE} = |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0|$ ). Está basada en la geometría de la célula y no en dos niveles fijos arbitrarios, por lo que aporta información sobre la organización en capas que tienen cierta relación con la convección en cuestión. Por este motivo, permite el tratamiento homogéneo de la convección elevada y la convección con raíz en superficie.

A fin de evitar ambigüedades, cabe destacar que la cizalladura efectiva no está



**Figura 2.1:** Interpretación gráfica de la cizalladura efectiva  $CIZE = |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0|$  y de la capa efectiva de espesor  $\Delta H^{ef} = H_{sup}^{ef} - H_{inf}^{ef}$ . Fuente: elaboración propia.

relacionada con el concepto de capa efectiva que se expone a continuación.

#### 2.2.4. Capa efectiva

De manera análoga al caso de la cizalladura, históricamente se han utilizado niveles fijos para definir la capa de interés en el cálculo de helicidad para la formación de supercélulas en un determinado ambiente [19, 23, 42]. Los análisis realizados a partir de este enfoque han resultado satisfactorios, especialmente cuando se trata de convección con raíz en superficie. En cualquier caso, esos niveles no dejan de ser arbitrarios, como se acaba de comentar en el apartado 2.2.3, y atienden de manera genérica (no particular) a los procesos de la dinámica supercelular.

Thompson *et al.* [26] definen la capa efectiva como una capa aproximada de la atmósfera representativa del flujo de entrada a la supercélula, que debe cumplir con un valor mínimo de inestabilidad estática y un máximo de inhibición convectiva. Su espesor es  $\Delta H^{ef} = H_{sup}^{ef} - H_{inf}^{ef}$  (Figura 2.1) y comprende las burbujas que satisfacen de manera simultánea las siguientes condiciones:

- $CAPE > 100 \text{ J kg}^{-1}$ ,
- $CIN < 250 \text{ J kg}^{-1}$ .

Las características de esta capa que alimenta a la supercélula, o que puede tener relación con el flujo de entrada a esta, dependerán del ambiente convectivo y, por tanto, no será una capa fija para todas las posibles situaciones. El uso de la capa efectiva permite, por tanto, una caracterización del ambiente convectivo más representativa que una dada a partir de niveles fijos y evita la sobrestimación de helicidad que se produce cuando se consideran capas que no tienen la flotabilidad suficiente (de nuevo adquieren especial importancia los casos de convección elevada, véase [26]). Dicho esto, debido a que el uso de niveles fijos cuenta con un amplio recorrido en el análisis de entornos convectivos, en este estudio se presentan rangos de valores obtenidos mediante ambos enfoques.

### 2.2.5. Helicidad relativa a la tormenta

La helicidad es una magnitud fluidodinámica que mide el grado de colinealidad entre la velocidad de un fluido y su vorticidad. Así, la helicidad relativa a la tormenta (SRH) es una medida de la componente de la vorticidad a lo largo de las líneas de corriente que entran en la célula convectiva y puede utilizarse para estimar la capacidad que tiene el ambiente de generar un flujo ascendente en rotación. La vorticidad que aporta una capa determinada comprendida entre las alturas  $h_a$  y  $h_b$  está relacionada con la helicidad relativa a la tormenta en dicha capa, cuya expresión se puede aproximar mediante la siguiente expresión [43]:

$$\text{SRH}_{h_a-h_b} = - \int_{h_a}^{h_b} \hat{\mathbf{k}} \cdot (\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}) \times \mathbf{S} \, dz, \quad (2.6)$$

donde  $\hat{\mathbf{k}}$  es un vector unitario a lo largo del eje vertical  $z$ ,  $\bar{\mathbf{v}}$  es la velocidad horizontal media en la capa,  $\mathbf{c}$  es la velocidad de propagación de la supercélula y  $\mathbf{S}$  es la cizalladura vertical media:

$$\mathbf{S} = \frac{d\bar{\mathbf{v}}}{dz}. \quad (2.7)$$

En este estudio se consideran las helicidad relativa a la tormenta  $\text{SRH}_{0-1 \text{ km}}$  (SRH1),  $\text{SRH}_{1-3 \text{ km}}$  (SRH13) y  $\text{SRH}_{0-3 \text{ km}}$  (SRH3). Además, se analiza la helicidad relativa a la tormenta en la capa efectiva (ESRH) haciendo uso de la ecuación 2.6:

$$\text{ESRH} = - \int_{H_{\text{inf}}^{\text{ef}}}^{H_{\text{sup}}^{\text{ef}}} \hat{\mathbf{k}} \cdot (\bar{\mathbf{v}} - \mathbf{c}) \times \mathbf{S} \, dz, \quad (2.8)$$

donde  $H_{\text{inf}}^{\text{ef}}$  y  $H_{\text{sup}}^{\text{ef}}$  se han definido en el apartado 2.2.4.

### 2.2.6. Índices adimensionales

El número de Richardson global (BRN) relaciona la energía potencial disponible para la convección con la cizalladura entre niveles medios y bajos de la troposfera y es un índice adimensional de amplio uso en el estudio de la convección organizada:<sup>5</sup>

$$\text{BRN} = \frac{\text{MLCAPE}}{\frac{1}{2}U^2}, \quad (2.9)$$

donde MLCAPE se define según la ecuación 2.1 y  $U$  es el módulo de la diferencia entre las velocidades medias del viento en la capa 0 – 6 km y en la capa 0 – 500 m, ambas ponderadas con la densidad del aire.

Otros índices de interés en el estudio de la formación de supercélulas son el parámetro compuesto de supercélulas, SCP (*Supercell Composite Parameter*), y el parámetro significativo de tornados, STP (*Significant Tornado Parameter*), ambos definidos en [45]. El SCP fue originariamente diseñado para identificar potenciales

<sup>5</sup>El BRN se define en Weisman y Klemp [37] a partir de una expresión deducida por Moncrieff y Green [44]. En estos dos artículos se sugiere la interpretación del denominador de 2.9 como una aproximación de la energía cinética del flujo entrante a la célula.

áreas de ocurrencia de supercélulas mediante la combinación de parámetros relacionados con la convección organizada normalizados mediante sus valores típicos. En su primera versión se definió mediante la siguiente expresión:

$$\text{SCP}_{\text{orig}} = \frac{\text{MUCAPE}}{1000 \text{ J kg}^{-1}} \frac{U}{40 \text{ m s}^{-1}} \frac{|\text{SRH3}|}{100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}, \quad (2.10)$$

donde MUCAPE se define según la ecuación 2.2, SRH3 según la ecuación 2.6 y  $U$  es la cizalladura que aparece en el denominador de la ecuación 2.9. El STP incluye otros parámetros adicionales que contribuyen favorablemente a la formación de tornados:

$$\text{STP}_{\text{orig}} = \frac{\text{MLCAPE}}{1000 \text{ J kg}^{-1}} \frac{\text{CIZ06}}{20 \text{ m s}^{-1}} \frac{|\text{SRH1}|}{100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \frac{2000 - \text{MLLCL}}{1500 \text{ m}}, \quad (2.11)$$

donde MLCAPE se define en la ecuación 2.1, CIZ06 es la cizalladura entre los niveles de 0 y 6 km sobre la superficie y MLLCL es el nivel de condensación por ascenso de la capa de mezcla superficial.

Los índices que se han utilizado en este estudio son los que aparecen en la revisión llevada a cabo por Thompson *et al.* en [46] y que se muestran a continuación:

$$\text{SCP} = \frac{\text{MUCAPE}}{1000 \text{ J kg}^{-1}} \frac{\text{CIZE}'}{20 \text{ m s}^{-1}} \frac{|\text{ESRH}|}{50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}, \quad (2.12)$$

$$\text{STP} = \frac{\text{MLCAPE}}{1500 \text{ J kg}^{-1}} \frac{\text{CIZE}'_{\text{sfc}}}{20 \text{ m s}^{-1}} \frac{|\text{ESRH}|}{150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \frac{2000 - \text{MLLCL}}{1500 \text{ m}} \frac{250 - \text{MLCIN}}{200 \text{ J kg}^{-1}}, \quad (2.13)$$

donde ESRH se define según la ecuación 2.8, MLCIN<sup>6</sup> es la CIN asociada a la capa de mezcla superficial y CIZE' es un término relacionado con la cizalladura efectiva global. Thompson *et al.* [46] marcan los siguientes rangos de valores para el término correspondiente a CIZE':

$$\frac{\text{CIZE}'}{20 \text{ m s}^{-1}} \equiv \begin{cases} 0 & \text{si } \text{CIZE} < 10 \text{ m s}^{-1}, \\ \frac{\text{CIZE}}{20 \text{ m s}^{-1}} & \text{si } 10 \leq \text{CIZE} \leq 20 \text{ m s}^{-1}, \\ 1 & \text{si } \text{CIZE} > 20 \text{ m s}^{-1}. \end{cases} \quad (2.14)$$

CIZE'<sub>sfc</sub> es equivalente a CIZE' pero asociada a la burbuja que parte desde la superficie:

$$\frac{\text{CIZE}_{\text{sfc}}}{20 \text{ m s}^{-1}} \equiv \begin{cases} 0 & \text{si } \text{CIZE}_{\text{sfc}} < 10 \text{ m s}^{-1}, \\ \frac{\text{CIZE}'_{\text{sfc}}}{20 \text{ m s}^{-1}} & \text{si } 10 \leq \text{CIZE}_{\text{sfc}} \leq 30 \text{ m s}^{-1}, \\ 1.5 & \text{si } \text{CIZE}_{\text{sfc}} > 30 \text{ m s}^{-1}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Por otro lado, el STP adopta por convenio el valor 0 para valores MLCIN > 250 J kg<sup>-1</sup>.

---

<sup>6</sup>El término asociado a la MLCIN ha sido modificado en consonancia con el criterio de signos empleado en este estudio.

### 2.3. Criterio de selección de la pasada del modelo

Para realizar el estudio cuantitativo del ambiente convectivo en la formación de supercélulas ha sido necesario adoptar un criterio de decisión de la pasada del modelo que sería más representativa. La resolución temporal en la determinación de la formación de la supercélula es de 10 minutos, dada por la disponibilidad de imágenes de radar descrita en la subsección 2.1. En el caso de salidas de modelo, como se ha indicado, se dispone de ocho pasadas diarias y, por tanto, de un análisis cada tres horas. Esta resolución temporal trihoraria permitiría seleccionar una pasada que en ningún caso difiriese en más de hora y media del instante de formación de la supercélula.

Se decidió seleccionar la pasada más cercana al inicio de la formación de la supercélula siempre que el ambiente no estuviese contaminado. Se adopta la definición de Gensini *et al.* [47] de ambiente contaminado como aquel que tiene MUCAPE igual a cero o si el promedio de la humedad relativa en la capa 0–6 km es mayor o igual al 90 %. Si la pasada más cercana es la inmediatamente posterior al instante de inicio de la convección, y esta representa un ambiente contaminado, se evalúa la pasada inmediatamente anterior. En caso de que la anterior se encuentre contaminada, sea esta la pasada más cercana o no, la supercélula se elimina del estudio. Con este criterio, siete supercélulas no duplicadas tienen ambientes contaminados y por tanto no se han utilizado en este trabajo. En trece casos en los que la pasada más cercana era la posterior, el ambiente estaba contaminado y se analizó la pasada anterior, por lo que en estos casos el instante de formación de la supercélula difiere en más de hora y media de la hora de la pasada.

Se estudiaron otros dos posibles criterios temporales de selección de la pasada más representativa aparte del ya mencionado del de la más cercana: la pasada inmediatamente anterior al inicio de la formación de la supercélula y un criterio de proximidad temporal no simétrico con preferencia de la pasada anterior al inicio de la convección (solo se elegía la pasada posterior si esta estaba menos de 60 minutos del inicio de la formación de la supercélula). Se realizaron test estadísticos de Anderson-Darling para  $k$ -muestras [48] a fin de determinar si se producían variaciones con nivel de significación  $\alpha = 0.05$  en las distribuciones de MUCAPE, CIZ06, CIZE, SRH3 y ESRH. Estos test tienen un mejor comportamiento que el de Kolmogorov-Smirnoff en situaciones en las que o solo varía la media, o solo la dispersión, o solo la simetría, o bien en las que para la misma media y desviación estándar solo varían las colas de la distribución, aparte de requerir distribuciones más pequeñas para obtener la suficiente significación estadística [49]. La hipótesis nula del test supone que las  $k$  muestras provienen de la misma población sin tener que especificar su función de distribución. Si se combinan los tres criterios temporales con la posibilidad de corregir o no por contaminación para cada giro de mesociclón, los test realizados entre las muestras correspondientes a los índices indicados anteriormente determinaron que no se puede descartar la hipótesis nula en ninguna de las 30 combinaciones posibles. El criterio de selección por cercanía

temporal con corrección por ambiente contaminado ha sido el adoptado finalmente.

Si se tienen en cuenta los criterios expuestos en la subsección 2.1, se ha generado una BD que contiene 565 casos de supercélulas identificadas en el periodo 2017–2021. De esos 565 casos, 61 han sido considerados como duplicados y 7 han sido eliminados por ambiente contaminado, por lo cual la caracterización del ambiente de inicio de formación de supercélulas se ha llevado a cabo a partir de 497 casos identificados únicos.

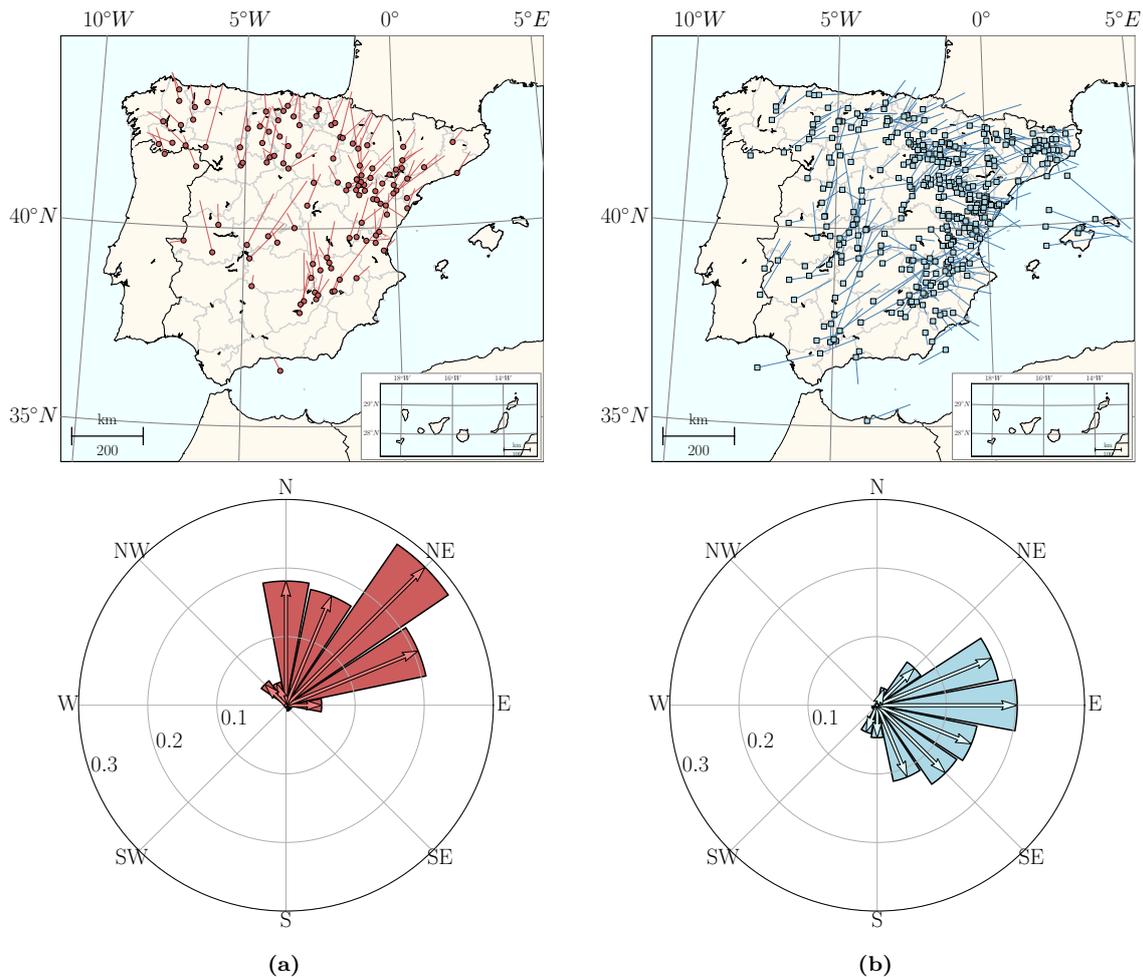
## 3. Resultados

En esta sección se presentan ciertas propiedades de las 497 supercélulas registradas en la BD según lo descrito en la sección 2. En la subsección 3.1 se hace una breve descripción de las características espaciotemporales de las supercélulas, así como de los sistemas convectivos de los que se originaron. En la subsección 3.2 se muestran las distribuciones de los parámetros e índices convectivos presentados en la subsección 2.2. En el análisis, la muestra ha sido estratificada según el giro del mesociclón: se denominará tipo A a aquellas supercélulas que contengan un mesoanticiclón (117 casos, representadas en color rojo ■) y tipo B a las que contengan un mesociclón (380 casos, representadas en color azul ■). Se han realizado test estadísticos de Anderson-Darling (ver subsección 2.3) para evaluar si existen diferencias con nivel de significación  $\alpha = 0.05$  en las distribuciones de los distintos índices entre las muestras tipo A y B. En esta subsección también se realiza un breve estudio de las hodógrafas compuestas de supercélulas espontáneas. Por último, en la subsección 3.3 se lleva a cabo una verificación del método de Bunkers para la determinación de la velocidad de propagación de las supercélulas.

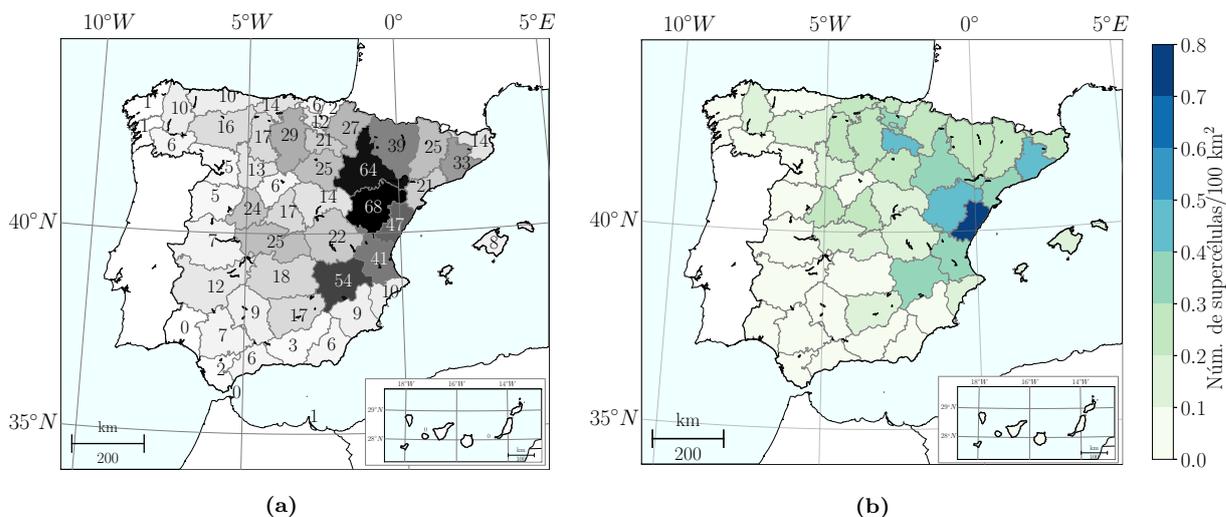
### 3.1. Caracterización espaciotemporal

En la parte superior de la Figura 3.1 se muestra sobre sendos mapas el punto de inicio de cada una de las 497 supercélulas registradas en la BD coloreado en función del giro del mesociclón. Se aprecia una mayor densidad de puntos en el noreste de la península y resulta de interés mencionar que no se ha detectado ninguna supercélula en la Comunidad Autónoma de Canarias a lo largo del periodo analizado. En la misma figura se incluyen en la parte inferior rosas de rumbos observados. En general, las supercélulas anticiclónicas se caracterizan por presentar una componente hacia el norte en su desplazamiento, mientras que las ciclónicas muestran una componente hacia el este. Este hecho es consistente con situaciones de flujo predominante del suroeste en capas medias y bajas.

A partir de las trayectorias que llevaron las supercélulas se puede evaluar por qué provincias ha existido un mayor tránsito y en cuáles se ha concentrado una mayor densidad. El mapa de la Figura 3.2a proporciona la frecuencia de tránsito de supercélulas por provincia. En él se indica el número de supercélulas observadas cuyas trayectorias han discurrido por cada provincia española a lo largo de su ciclo



**Figura 3.1:** Mapa con la localización del inicio de la formación (fila superior) y rosa de rumbos (fila inferior) considerando las 497 supercélulas registradas en la BD separadas en supercélulas anticiclónicas (a) y ciclónicas (b). En los mapas de localización del inicio de la formación, las líneas que se muestran unen el punto de inicio con el de fin de cada supercélula.



**Figura 3.2:** Número de supercélulas (a) y número de supercélulas por cada 100 km<sup>2</sup> (b) que han transitado por provincia en el periodo 2017-2021.

de vida, desde su inicio hasta la disipación. Se puede observar que Teruel es la más transitada (68 casos), seguida por Zaragoza (64), Albacete (54), Castellón (47), Valencia (41) y Huesca (39), entre las más frecuentadas. En el mapa de la Figura 3.2b se representa la densidad de ocurrencia de supercélulas por cada 100 km<sup>2</sup> en cada provincia y en el periodo de estudio. Cabe destacar que el máximo<sup>7</sup> lo registra Castellón con 0.71 supercélulas por cada 100 km<sup>2</sup>, seguida por Teruel, Barcelona, La Rioja, Álava, Valencia, Zaragoza y Albacete, con valores de densidad comprendidos entre 0.46 y 0.36 supercélulas por cada 100 km<sup>2</sup>. En la Sierra de Gúdar y el Maestrazgo, entre las provincias de Castellón y Teruel, estaría el máximo de días anuales de supercélulas en España [50].

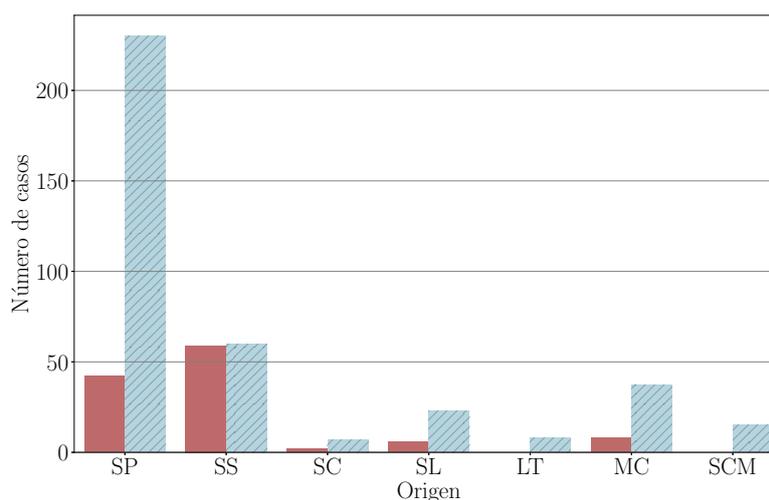
La mayor densidad de sistemas supercelulares en el tercio este peninsular en general y cuadrante nororiental en particular puede ser atribuida a diversos factores. En estas zonas existe mayor acceso a la humedad del Mediterráneo, que puede contribuir a la inestabilización del aire en capas bajas y, a menudo, a la formación de una línea seca en la frontera con zonas más altas del interior peninsular. Si bien esta no suele ser ni tan clara ni tan activa como las que se producen en las Grandes Llanuras norteamericanas, desempeña en ocasiones el mismo papel en el disparo de la convección. Existen dos máximos de días de tormenta: uno en los Pirineos y otro en la parte oriental del sistema Ibérico, en el este de Teruel y oeste de Castellón [51,52]. Estos focos convectivos están relacionados con la altitud, pues la inhibición convectiva, principalmente, suele ser menor en altura que en los valles, y las tormentas se desarrollan con más facilidad. Sin embargo, la cantidad de supercélulas observadas es significativamente superior en número y adversidad en la zona del Ibérico frente a los Pirineos, probablemente debido a que la orografía de estos últimos tiene la suficiente extensión y altitud como para desorganizar el flujo en niveles bajos que alimenta a las supercélulas que llegan formadas desde el llano y, por tanto, también para que se organicen adecuadamente *in situ*, así como a que las advecciones mediterráneas llegan más a menudo y con mayores niveles de humedad. Otro factor coadyuvante al desarrollo de supercélulas en el noreste peninsular son los valores de cizalladura y helicidad sensiblemente superiores al resto de la Península, como se puede apreciar en [53].

En la Figura 3.3, se representa un histograma de frecuencias absolutas para la BD estratificada por las estructuras meteorológicas que propiciaron la formación de las diferentes supercélulas y por giro del mesociclón. Se han identificado los siguientes orígenes mediante la visualización de imágenes radar, todos ellos incluidos en el trabajo de Smith *et al.* [31], y se indica entre paréntesis el porcentaje que suponen del total de casos:

- SP: supercélulas de formación espontánea (54.7%).
- SS: formadas a partir de un *storm-splitting* (24.0%).

---

<sup>7</sup>Al haberse registrado en la BD una supercélula que transitó por Melilla, en realidad el máximo de densidad se alcanza en ese territorio con un valor de 7.46 supercélulas por cada 100 km<sup>2</sup> en el periodo estudiado.



**Figura 3.3:** Número de casos de supercélulas según el modo convectivo de origen (ver texto). Cajas rojas ■: supercélulas con giro anticiclónico (A); cajas azules ■ rayadas: supercélulas con giro ciclónico (B).

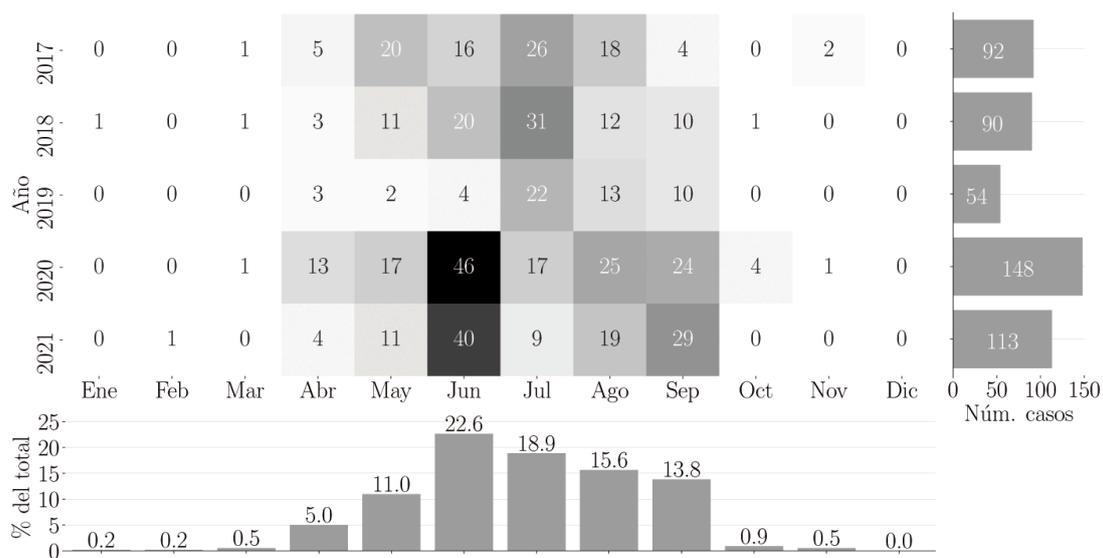
- SC: supercélulas en grupo (*cluster*) (1.8%).
- SL: supercélulas en línea (5.9%).
- LT: formadas a partir de una línea de turbonada (1.6%).
- MC: formadas a partir de un sistema multicelular (9.0%).
- SCM: formadas a partir de un sistema convectivo de mesoescala (3.0%).<sup>8</sup>

Las distribuciones anual y horaria de supercélulas se incluyen, respectivamente, en las Figuras 3.4 y 3.5. Como es de esperar, la formación de supercélulas coincide con la época convectiva en España, que abarca aproximadamente desde mayo hasta septiembre, y el 67% del total se forman entre las 13 y las 18 UTC. El año 2020 fue especialmente activo en la formación de supercélulas y el inicio de la época convectiva se adelantó al mes de abril. Por último, la Figura 3.6 incluye el histograma de frecuencias absolutas de la duración de los casos registrados. La distribución muestra una clara asimetría positiva, con la moda entre 60 y 90 minutos y las supercélulas de larga duración (mayor o igual a 4 horas [40]) suponen alrededor del 2.6% del total.

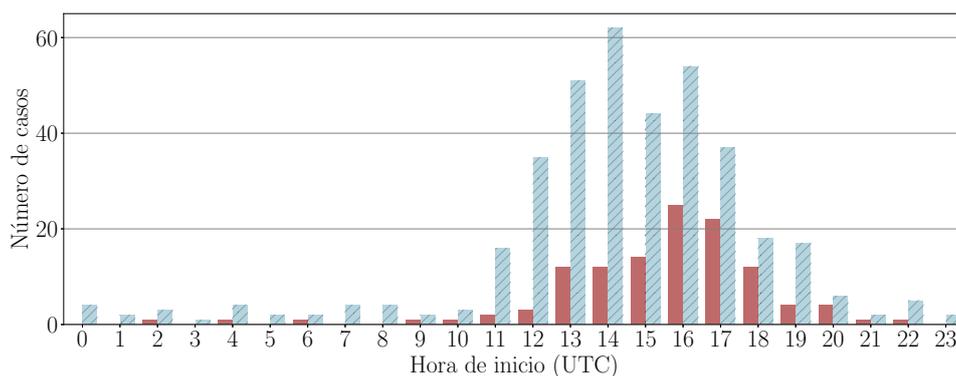
## 3.2. Características del ambiente de formación de supercélulas

En esta subsección se muestran las características del ambiente en el inicio de formación de las supercélulas mediante diagramas de cajas de distintos índices y parámetros. En cada diagrama, la línea horizontal de color negro indica el valor de la mediana, la caja está delimitada entre los percentiles 25 y 75, y por tanto abarca

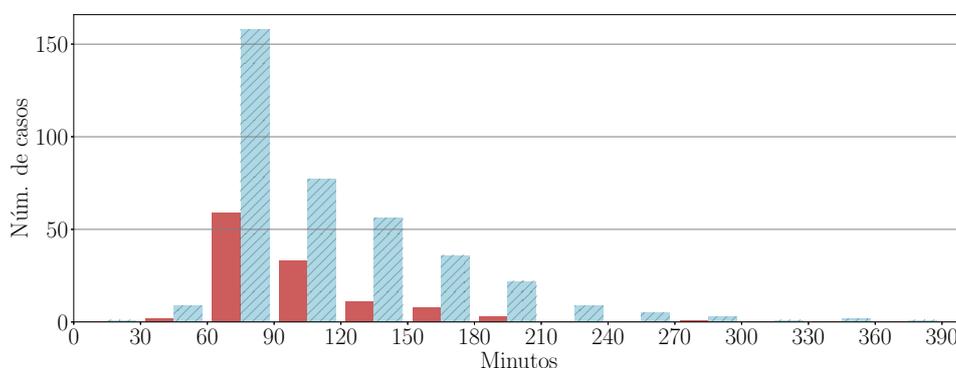
<sup>8</sup>Se está considerando que un sistema convectivo de mesoescala está compuesto por un área contigua de precipitación con una longitud de 100 km o más en alguna de sus dimensiones, tal y como se define en el [Glosario de Meteorología de la AMS](#).



**Figura 3.4:** Número de supercélulas por año y mes en el periodo 2017–2021 (tabla). Número total de casos por año (diagrama a la derecha) y proporción de casos por meses en el periodo 2017–2021 (diagrama inferior).



**Figura 3.5:** Hora de inicio de las supercélulas. Cajas rojas ■: supercélulas con giro anticiclónico (A); cajas azules ■ rayadas: supercélulas con giro ciclónico (B).



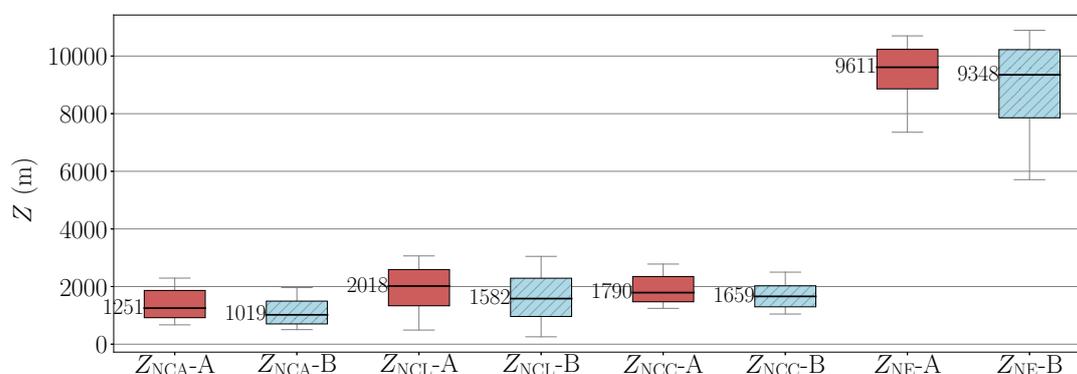
**Figura 3.6:** Histograma de frecuencias absolutas de la duración de las supercélulas registradas. Aproximadamente dos tercios de las supercélulas registradas tienen una duración inferior a dos horas. Cajas rojas ■: supercélulas con giro anticiclónico (A); cajas azules ■ rayadas: supercélulas con giro ciclónico (B).

el rango intercuartílico (IQR), y los bigotes inferior y superior se corresponden con los percentiles 10 y 90, respectivamente.

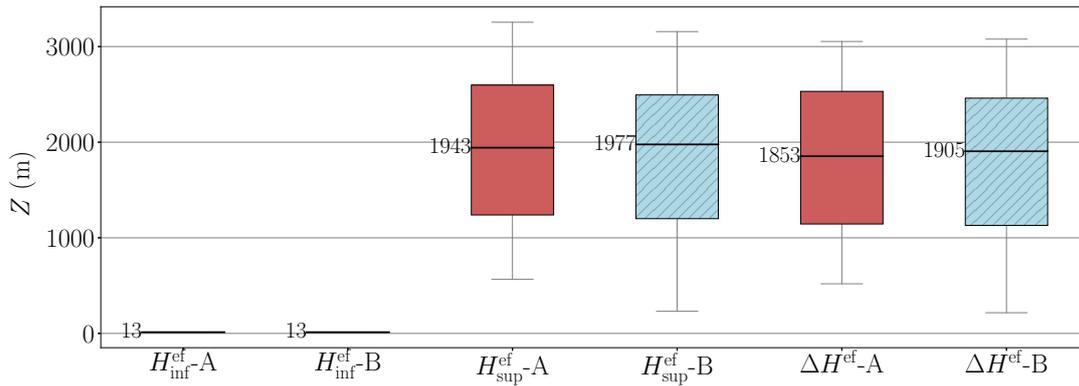
Las distribuciones obtenidas de algunos de los parámetros se han representado gráficamente junto con las obtenidas por otros autores, cuyos estudios toman como fuente de datos episodios convectivos en EE. UU. Esta representación conjunta permite comparar rápidamente los resultados de distintos trabajos, aunque se han de tener en cuenta diversos detalles: por un lado, los tamaños de las muestras no son iguales en todos los casos, por lo que las dispersiones de las distribuciones obtenidas no son directamente comparables; por otro lado, algunos de los estudios de otros autores se basan en supercélulas tipo B exclusivamente; por último, los criterios utilizados para calcular según qué índices convectivos varían según el autor y pueden diferir de los adoptados en este trabajo. A pesar de estos inconvenientes, se ha considerado que podría ser interesante la representación conjunta para comparar los valores normalmente aceptados de los rangos típicos de ciertos índices convectivos con los obtenidos para supercélulas en nuestro territorio.

### 3.2.1. Niveles termodinámicos y capa efectiva

La Figura 3.7 incluye las distribuciones de niveles termodinámicos característicos de la representación de sondeos en diagramas aerológicos. La muestra presenta valores medianos del nivel de condensación por ascenso (NCA) de 1000 – 1250 m, mientras que las medianas del nivel de convección libre (NCL) y del nivel de condensación convectiva (NCC) son del orden de 550 a 750 m superiores. La diferencia entre los valores del nivel de equilibrio (NE) y el NCL proporciona una idea de la profundidad de la convección en estos sistemas. Por otra parte, la Figura 3.8 representa las distribuciones de altura de la base, altura del tope y espesor de la capa efectiva. Casi la totalidad de las supercélulas registradas tienen la base de la capa efectiva a baja altura y su espesor típico ronda los 1850 – 1900 m, si bien la dispersión de la altura del tope es notablemente superior al caso de la base. De las 497 supercélulas registradas en la BD, solo en 12 de ellas el ambiente de inicio de la formación no cumplía las condiciones para poder definir una capa efectiva.



**Figura 3.7:** Distribuciones de las alturas del nivel de condensación por ascenso ( $Z_{NCA}$ ), nivel de convección libre ( $Z_{NCL}$ ), nivel de condensación convectiva ( $Z_{NCC}$ ) y nivel de equilibrio ( $Z_{NE}$ ).



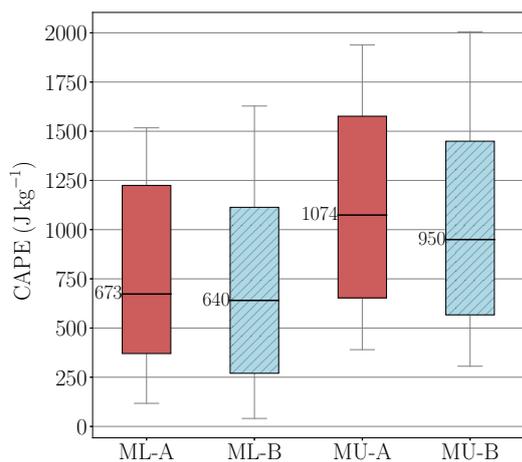
**Figura 3.8:** Distribuciones de la altura de la base ( $H_{\text{inf}}^{\text{ef}}$ ) y tope ( $H_{\text{sup}}^{\text{ef}}$ ) de la capa efectiva, así como su espesor ( $\Delta H^{\text{ef}}$ ).

### 3.2.2. Índices relacionados con la convección

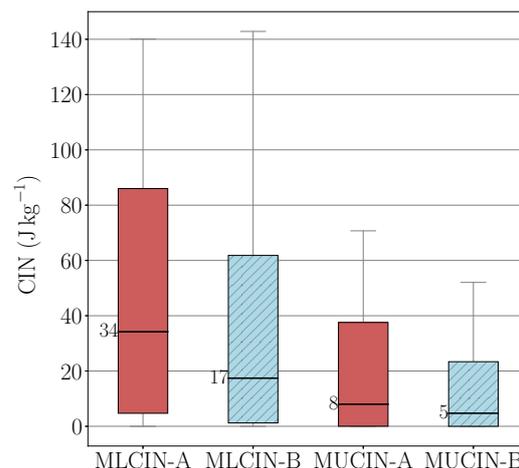
En las Figuras 3.9–3.18 se muestran las distribuciones de los distintos parámetros e índices utilizados en este estudio y descritos en la subsección 2.2. Como se puede observar en la Figura 3.9, las distintas CAPE no se ven afectadas de una manera apreciable por el giro del mesociclón. Más del 75 % de las supercélulas registradas en la BD presentan una MUCAPE asociada al ambiente en el inicio de la convección por encima de  $550 \text{ J kg}^{-1}$ .<sup>9</sup> En el caso de la MLCAPE, ese valor es cercano a  $300 \text{ J kg}^{-1}$ . En la Figura 3.10 se muestran las distintas CIN, donde las anticiclónicas presentan mayores valores que las ciclónicas. Más de un 75 % de las supercélulas tiene valores de MUCIN por debajo de  $30 \text{ J kg}^{-1}$ ; mientras que para la MLCIN ese valor se encuentra en torno a  $70 \text{ J kg}^{-1}$ . En la Figura 3.11 se representa una comparación entre las distribuciones de MLCAPE y MUCAPE obtenidas en este trabajo y distintas MLCAPE presentadas por otros autores. Aunque la comparación directa no es inmediata, puesto que la MLCAPE está definida de forma distinta en función del estudio elegido, se puede comprobar que los rangos de MLCAPE del presente trabajo se encuentran en el rango inferior de las distribuciones que aportan otros autores. Merece la pena destacar que la dispersión de las distribuciones de CAPE es sensiblemente menor en comparación con el resto: el IQR de las supercélulas B es  $270\text{--}1113 \text{ J kg}^{-1}$ , mientras que el de las supercélulas (S) de Rasmussen y Blanchard [19] es  $283\text{--}1821 \text{ J kg}^{-1}$ , y el de las no tornádicas (NT) de Thompson *et al.* [23] es  $805\text{--}2242 \text{ J kg}^{-1}$  (en estos dos artículos citados se realiza el análisis con supercélulas B exclusivamente). Por otro lado, conviene indicar que el número de supercélulas marginales en el trabajo de Thompson *et al.* [23] es 15 y, por tanto, considerablemente menor que el del resto de categorías.

Las cizalladuras asociadas a distintos niveles aparecen representadas en la Figura 3.12. No se aprecian diferencias significativas en las distribuciones de cada cizalladura que puedan ser atribuidas al giro del mesociclón. Es interesante comprobar que la CIZE (Ef) presenta una distribución muy similar a la CIZ03. En la

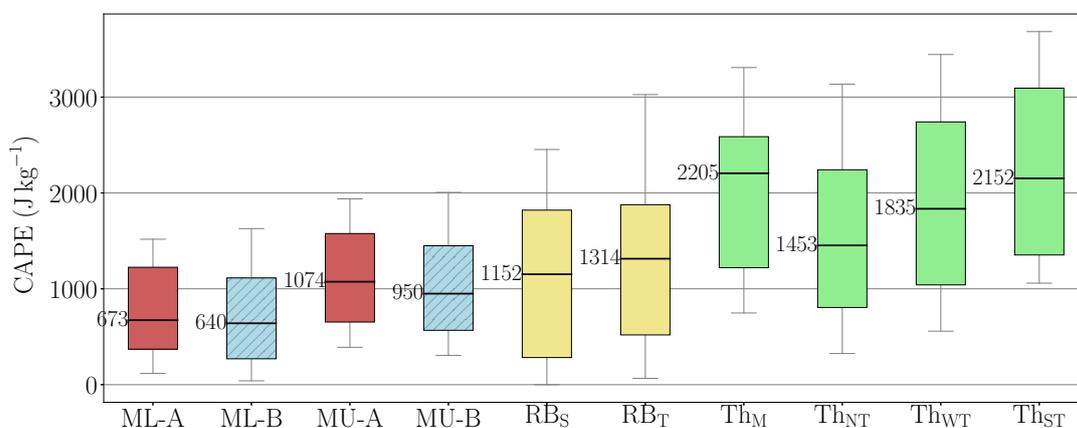
<sup>9</sup>Nótese que la amplia mayoría de las burbujas más inestables parten desde los niveles más próximos a la superficie.



**Figura 3.9:** Distribuciones de MLCAPE (ML) y MUCAPE (MU).



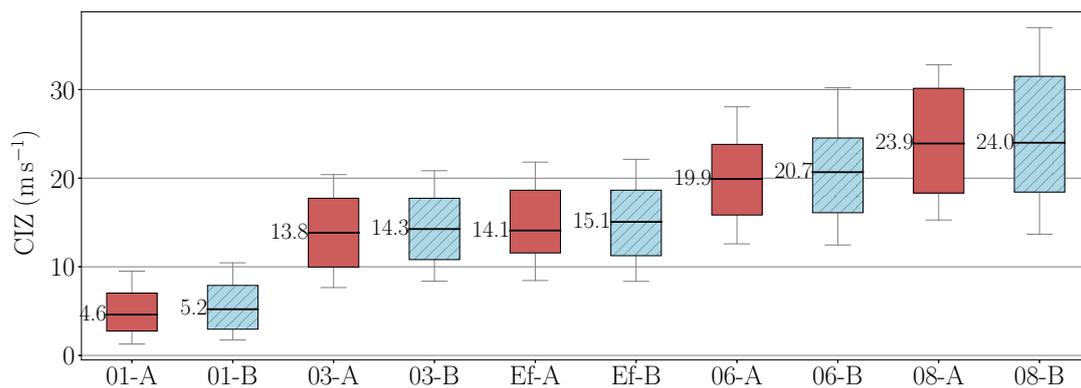
**Figura 3.10:** Distribuciones de MLCIN y MUCIN.



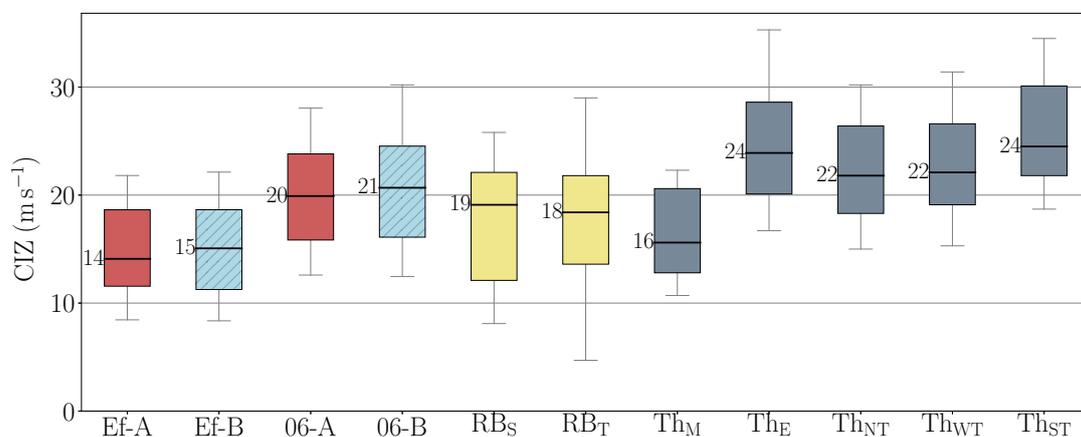
**Figura 3.11:** Distribuciones de CAPE. Presente estudio: MLCAPE (ML) y MUCAPE (MU); otros autores: RB [19] (MLCAPE con capa de mezcla de los primeros 1000 m para supercélulas (S) y supercélulas tornádicas (T)), Th [23] (MLCAPE con capa de mezcla de 100 hPa para supercélulas marginales (M), no tornádicas (NT), débilmente tornádicas (WT) y significativamente tornádicas (ST)).

Figura 3.13 se comparan la CIZE y CIZ06 con las CIZ06 de Rasmussen y Blanchard [19] y con las CIZE de Thompson *et al.* [27]. La distribución de CIZ06 de este estudio es similar a las presentadas por Rasmussen y Blanchard, si bien exhiben una mayor simetría; la de CIZE se asemeja a la distribución correspondiente a supercélulas marginales de Thompson *et al.*, aunque con un rango interdecílico ligeramente superior. En cualquier caso, los valores de CIZE obtenidos son en general inferiores a los relativos al resto de tipos de supercélulas.

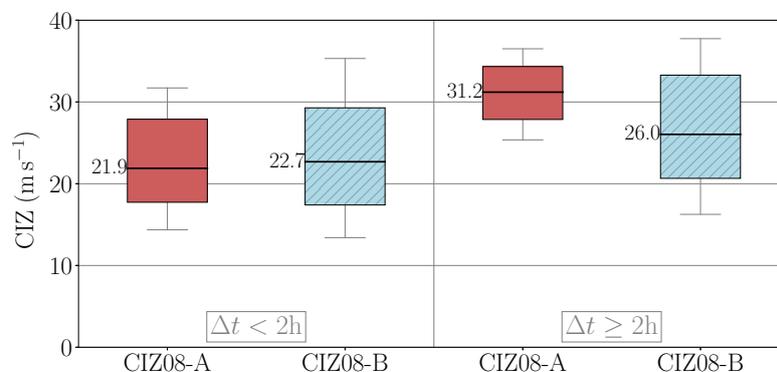
La duración de un sistema supercelular viene condicionada por las características mesoescalares y sinópticas del ambiente. Por ejemplo, las supercélulas de vida superior a cuatro horas se ven favorecidas cuando se desarrollan en el seno de un amplio sector cálido o en el entorno de fronteras mesoescalares y sinópticas [40]. Tradicionalmente, se emplea la CIZ08 como indicador de las condiciones propensas a la aparición de supercélulas de larga duración. En la Figura 3.14 se representan las distribuciones de este parámetro para los casos de la BD con la muestra es-



**Figura 3.12:** Distribuciones de cizalladuras: CIZ01 (01), CIZ03 (03), CIZE (Ef), CIZ06 (06) y CIZ08 (08).



**Figura 3.13:** Distribuciones de cizalladuras. Presente estudio: CIZE (Ef) y CIZ06 (06); otros autores: RB [19] (CIZ06 para supercélulas (S) y supercélulas tornádicas (T)), Th [27] (CIZE para supercélulas marginales (M), de convección elevada (E), no tornádicas (NT), débilmente tornádicas (WT) y significativamente tornádicas (ST)).



**Figura 3.14:** Distribuciones de CIZ08 según la longevidad del sistema: duraciones inferiores a 2 h (izq.) e iguales o superiores a 2 h (der.).

tratificada según la duración y el giro del mesociclón. Si bien las distribuciones no muestran diferencias estadísticamente significativas en función del giro, la duración representa un factor diferenciador al considerar el umbral de las dos horas. Tanto en supercélulas ciclónicas como en anticiclónicas, las estructuras más longevas muestran mayor CIZ08, especialmente en el caso de las anticiclónicas.

Como se comentó en la subsección 2.2, otro parámetro muy utilizado en el estudio de supercélulas es la helicidad relativa a la tormenta. En la Figura 3.15, se muestran las distribuciones de SRH1, SRH13, SRH3 y ESRH. Si se comparan las distribuciones de las helicidad de las ciclónicas con las distribuciones de las helicidad cambiadas de signo de las anticiclónicas, se encuentran diferencias con significación estadística en todos los casos salvo en la SRH13 y, además, las ciclónicas muestran valores mayores. Como se puede comprobar a través de la comparación de SRH3-B y ESRH-B del presente estudio con la SRH3 de Rasmussen y Blanchard [19] y con la ESRH de Thompson *et al.* [27] (Figura 3.16), la distribución de SRH3-B se asemeja a la obtenida por Rasmussen y Blanchard para supercélulas no tornádicas, mientras que la distribución de ESRH-B tiene un amplio solapamiento con las no tornádicas de Thompson *et al.*, aunque la mediana es apreciablemente menor. Como apunta Bunkers [54], existe cierto desconcierto con la observación de supercélulas anticiclónicas persistentes e intensas en ambientes que, aparentemente, no son favorables para su formación, como son aquellos en los que la cizalladura vertical del viento gira en el sentido de las agujas del reloj con la altura (hodógrafa con concavidad hacia abajo). Una supercélula anticiclónica que se desarrolle en un ambiente como el descrito tenderá a tener asociadas SRH menores en valor absoluto que las que tendría una ciclónica, e incluso en ciertas capas podrá presentar SRH positiva. En este estudio, se obtienen valores positivos de SRH en supercélulas anticiclónicas en un 34 % de los casos para la SRH1-A, un 26 % para la ESRH-A, un 12 % para la SRH3-A y un 6 % para la SRH13-A. Bunkers [54] calcula la SRH en distintas capas a partir de una muestra de 60 supercélulas anticiclónicas (ver su FIG. 4) y, aunque obtiene porcentajes de valores positivos en las capas distintos a los que se encuentran en este trabajo, existe una coincidencia entre ambos estudios en que la SRH13-A es un mejor indicador potencial de supercélulas anticiclónicas que la SRH3.

Otros índices adimensionales que se han estudiado son el BRN, representado en la Figura 3.17, y los parámetros SCP y STP, ambos en la Figura 3.18. Respecto al BRN, no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre supercélulas A y B. En cambio, los parámetros SCP y STP exhiben un comportamiento diferenciado en función del giro del mesociclón: las supercélulas ciclónicas tienden a presentar mayores valores de SCP y STP que las anticiclónicas. La comparación de los índices SCP y STP con los resultados de Thompson *et al.* [46] se muestran en las Figuras 3.19a y 3.19b, respectivamente. Los valores aportados por estos autores son notablemente superiores a los correspondientes a la BD, lo cual es consistente con la mayor frecuencia de supercélulas de alta intensidad y con carácter tornádico en sus regiones de estudio.

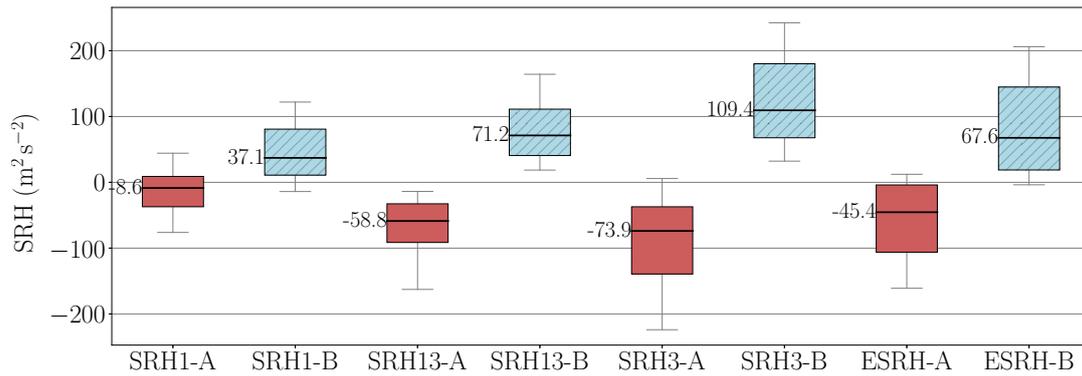


Figura 3.15: Distribuciones de helicidadas relativas a la tormenta: SRH1, SRH13, SRH3 y ESRH.

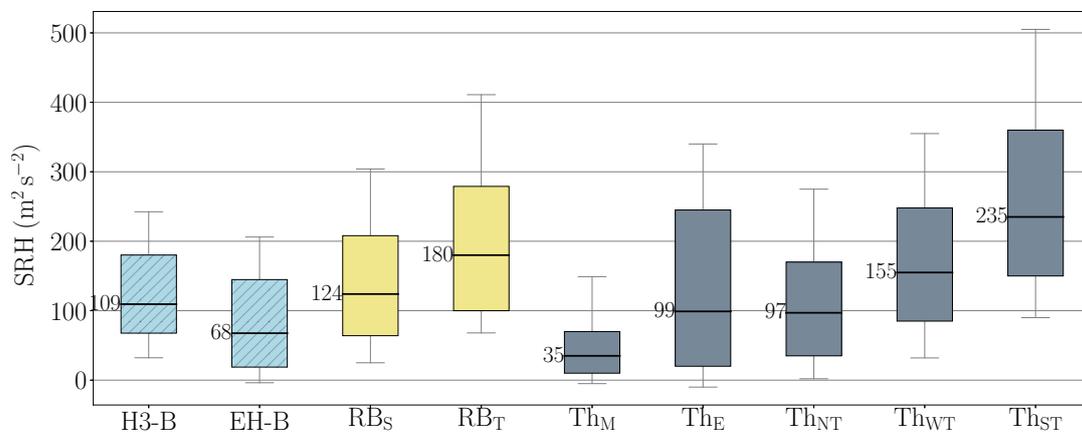


Figura 3.16: Distribuciones helicidadas relativas a la tormenta para supercélulas con giro ciclónico (B). Presente estudio: SRH3 (H3-B) y ESRH (EH-B); otros autores: RB [19] (SRH3 para supercélulas (S) y supercélulas tornádicas (T)), Th [27] (ESRH para supercélulas marginales (M), de convección elevada (E), no tornádicas (NT), débilmente tornádicas (WT) y significativamente tornádicas (ST)).

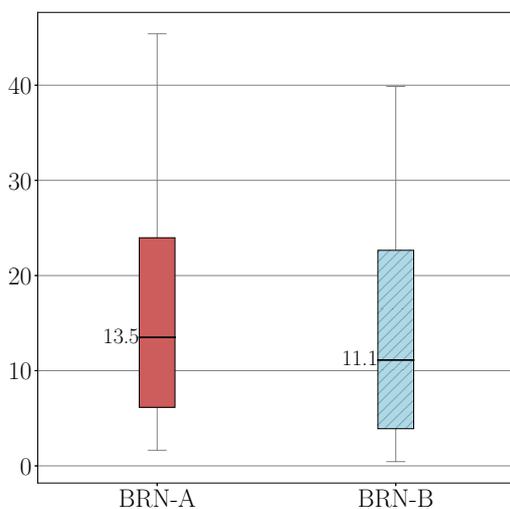


Figura 3.17: Distribuciones de BRN.

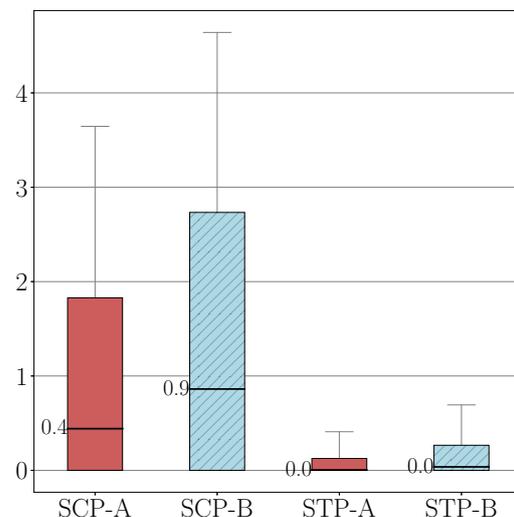
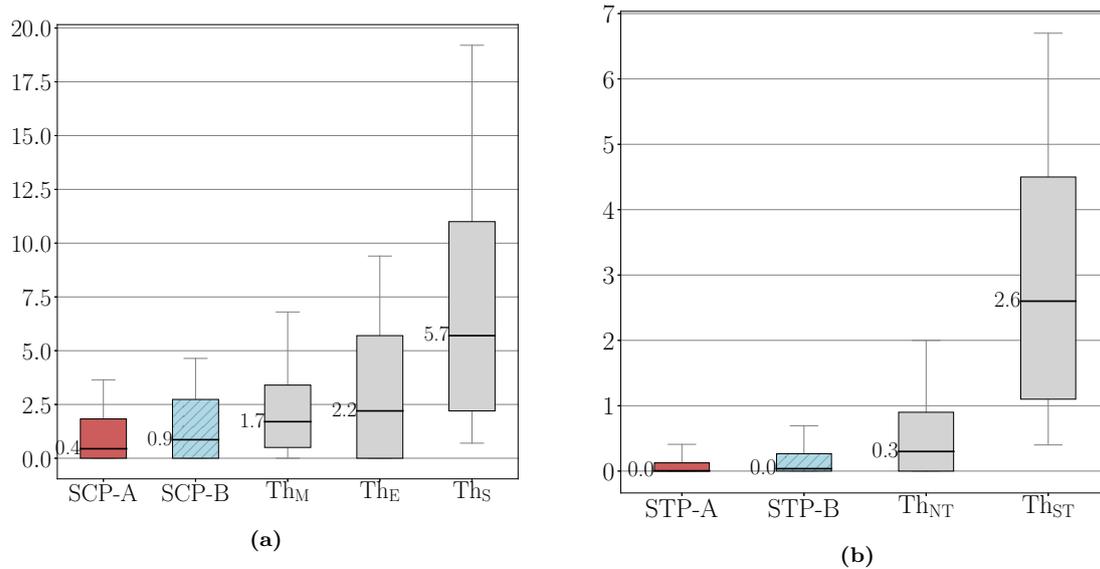


Figura 3.18: Distribuciones de SCP y STP.



**Figura 3.19:** Distribuciones de parámetros compuestos (a) SCP y (b) STP. Presente estudio: SCP y STP; otro autor:  $Th$  [26] (SCP y STP para supercélulas marginales (M), de convección elevada (E), supercélulas (SP), no tornádicas (NT) y significativamente tornádicas (ST)).

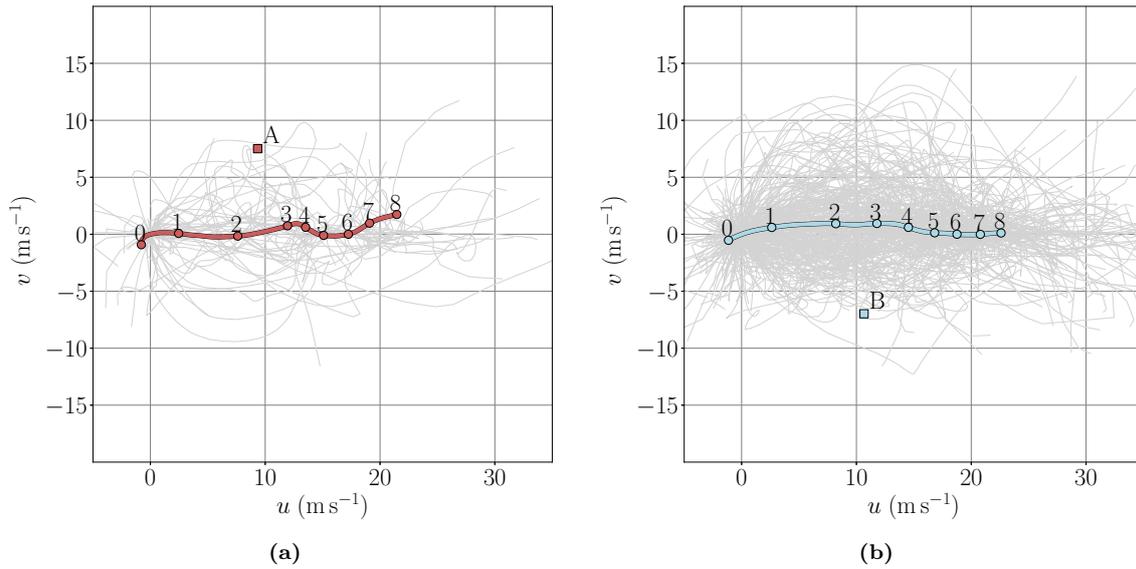
### 3.2.3. Hodógrafas compuestas de supercélulas espontáneas

Como se indicó al inicio de la sección 3, el origen de más de la mitad de las supercélulas registradas en la BD es por formación espontánea (SP). En este apartado se realiza un análisis de las hodógrafas correspondientes a los ambientes que propician la formación de estas supercélulas. Para ello, se van a estudiar composiciones de hodógrafas siguiendo las indicaciones que aparecen en [54]:

- i. Se traslada el origen de la hodógrafa al punto definido por el viento medio en la capa 0 – 500 m.
- ii. Se rota la hodógrafa de tal forma que el vector cizalladura entre 0 y 6 km sea paralelo al eje de abscisas y apuntando hacia valores crecientes.
- iii. Se promedian las componentes de la velocidad del viento en función de la altura.
- iv. Se promedian las componentes de la velocidad de propagación de las supercélulas calculadas mediante el método de Bunkers.

En la Figura 3.20 se presentan las composiciones de hodógrafas de las supercélulas espontáneas anticiclónicas (SP-A, 42 casos) y ciclónicas (SP-B, 230 casos) de la BD. A primera vista se puede comprobar la variabilidad que existe entre las distintas hodógrafas dentro de cada grupo. Al tratarse de un promedio, la composición muestra características suavizadas de las hodógrafas de los miembros del conjunto y se producen compensaciones en ciertos niveles que enmascaran información de interés. En cualquier caso, a partir de estas composiciones se pueden destacar ciertas características de los distintos ambientes.

En ambas hodógrafas se aprecia una cizalladura más elevada en los 2 primeros kilómetros que en los niveles más altos, donde la diferencia de velocidad con la altura



**Figura 3.20:** Hodógrafas compuestas de (a) SP-A (42 casos) y (b) SP-B (230 casos). Los números sobre las hodógrafas indican la altura en km, mientras que los puntos A y B representan los promedios de la velocidad de desplazamiento, calculada según el método de Bunkers [55], de las supercélulas representadas. La hodógrafa de cada una de las supercélulas utilizadas para la composición aparece en gris claro.

se va reduciendo. La curvatura en la capa 0–3 km es cóncava hacia abajo en las SP-B, mientras que en las SP-A hay un cambio de curvatura alrededor de la altura de 1 km, pasando de cóncava hacia abajo en aproximadamente el primer kilómetro a cóncava hacia arriba en la capa de 1–3 km. Esa curvatura del primer kilómetro en la composición proporciona una SRH positiva y, por tanto, no coherente con el giro del mesociclón, lo que favorece que las distribuciones de SRH1-A y SRH3-A se encuentren más desplazadas hacia los valores positivos que la de SRH13-A (ver Figura 3.15).

### 3.3. Verificación del método de Bunkers

El método de Bunkers [55–57] permite estimar la velocidad de desplazamiento de las supercélulas,  $\mathbf{v}_{\text{Bunkers}}$ . El cálculo se realiza en función de un viento medio  $\mathbf{v}_{\text{med}}$  y de una cizalladura vertical media  $\mathbf{v}_{\text{CIZ}}$ :

$$\mathbf{v}_{\text{Bunkers}}^{\text{A/B}} = \mathbf{v}_{\text{med}} \pm D \left( \hat{\mathbf{k}} \times \frac{\mathbf{v}_{\text{CIZ}}}{|\mathbf{v}_{\text{CIZ}}|} \right), \quad (3.1)$$

donde  $\mathbf{v}_{\text{med}}$  es la velocidad media del viento en la capa 0 – 6 km,  $\hat{\mathbf{k}}$  es un vector unitario dirigido a lo largo del eje vertical en sentido positivo y  $D = 7.5 \text{ m s}^{-1}$  es un factor determinado a partir del estudio de 290 hodógrafas correspondientes al ambiente asociado a la formación de supercélulas en EE. UU. [55]. Las supercélulas anticiclónicas (A) adoptan el signo positivo del segundo término de la ecuación 3.1 y las ciclónicas (B), el negativo.

En los siguientes apartados se lleva a cabo una comprobación del método de Bun-

kers para los casos registrados en la BD. La velocidad observada de la supercélula se expresa como

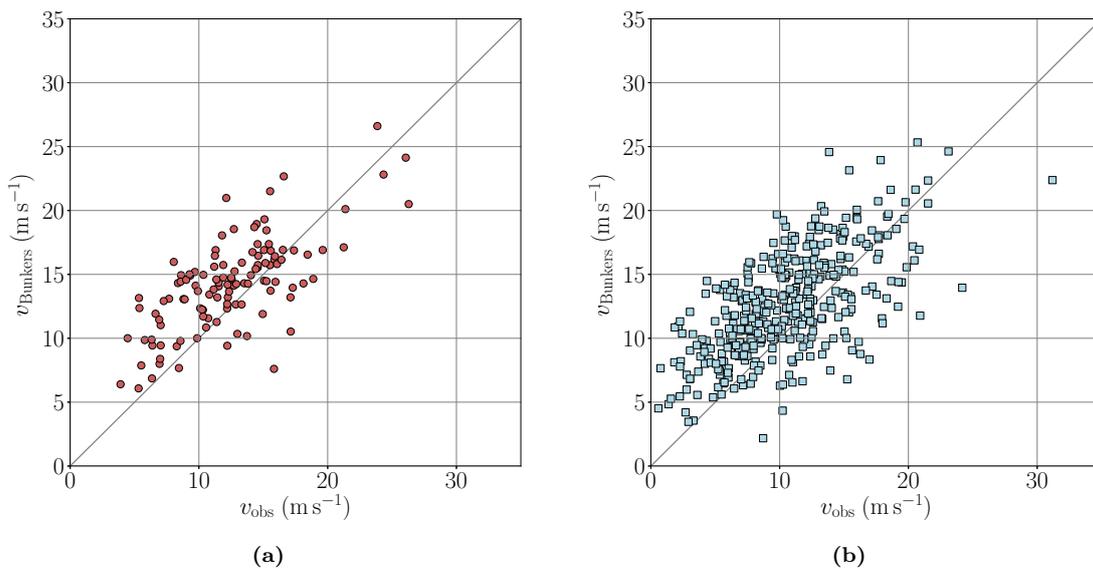
$$\mathbf{v}_{\text{obs}} = v \cos \phi \hat{\mathbf{i}} + v \sin \phi \hat{\mathbf{j}}, \quad (3.2)$$

donde el primer sumando del segundo miembro de la ecuación es la componente zonal de la velocidad de la supercélula y el segundo, la meridiana. El ángulo  $\phi$  es el que forma el vector velocidad con la componente zonal de la velocidad en cada punto. Téngase en cuenta que el análisis del rumbo seguido por las supercélulas que se presenta en esta subsección se realizará a partir del ángulo  $\phi$ , si bien el rumbo,  $\Phi$ , se define como el ángulo que forman la dirección norte y la de desplazamiento, creciente en el sentido de las agujas del reloj, por lo que la relación entre ambos ángulos es  $\Phi = \frac{\pi}{2} - \phi$ .

### 3.3.1. Módulo de la velocidad de desplazamiento

En la Figura 3.21 se representan en un diagrama de dispersión los módulos de las velocidades de las supercélulas obtenidos a partir del método de Bunkers ( $v_{\text{Bunkers}}$ ) frente a sus observaciones correspondientes ( $v_{\text{obs}}$ ). Nuevamente, la muestra se estratifica en supercélulas anticiclónicas y ciclónicas.

La velocidad observada  $v_{\text{obs}}$  fue calculada a partir de las posiciones de inicio y fin de cada supercélula y representa su velocidad media a lo largo de todos los ciclos radar en que se aprecia. El método de Bunkers no arroja resultados firmemente satisfactorios para el módulo de la velocidad (los coeficientes de correlación lineal son  $\rho_A = 0.71$  y  $\rho_B = 0.65$ ) y se aprecia una tendencia a la sobrestimación, como se puede comprobar a partir del valor del sesgo en la Tabla 1, donde se incluyen también los errores medios cuadráticos, RMSE (para una descripción de estas métricas ver, por ejemplo, Wilks [58]). Entre las posibles fuentes de error se encuentran las



**Figura 3.21:** Comparación de la velocidad prevista mediante el método de Bunkers y la velocidad observada para supercélulas (a) A y (b) B.

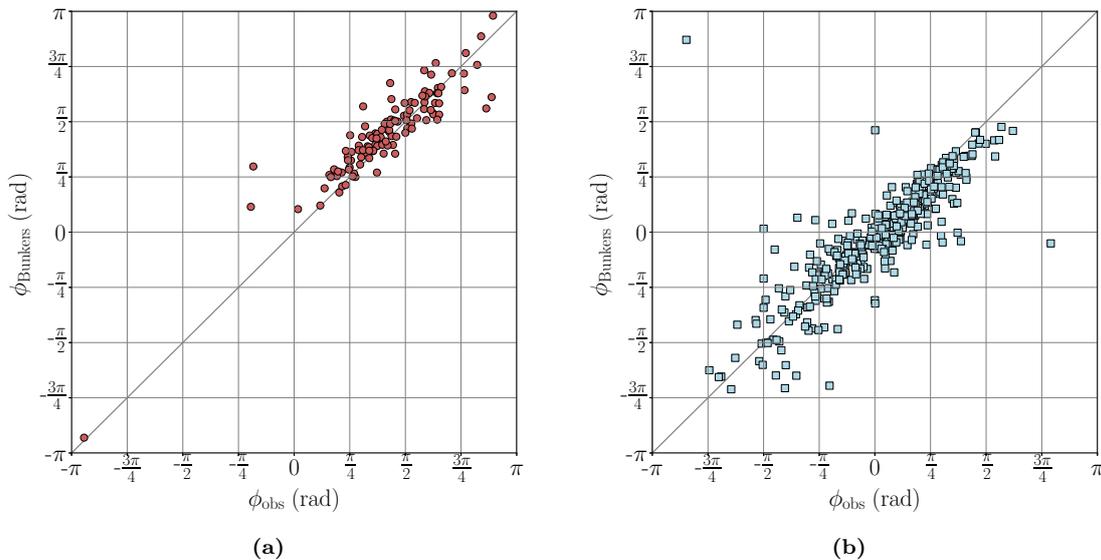
**Tabla 1:** RMSE y sesgo para el módulo de la velocidad y rumbo según el método de Bunkers.

	$v$		$\phi$	
	RMSE ( $\text{m s}^{-1}$ )	Sesgo ( $\text{m s}^{-1}$ )	RMSE ( $^{\circ}$ )	Sesgo ( $^{\circ}$ )
Giro A	3.69	1.75	17.94	5.56
Giro B	4.25	2.10	27.66	-7.23

propias limitaciones del método (como, por ejemplo, que no considere la interacción de la supercélula con su entorno, máxime en ambientes donde la orografía puede representar un papel importante) o el uso de una calibración del factor  $D$  de la ecuación 3.1 que puede estar fuera de su rango de aplicabilidad. Un estudio más exhaustivo del movimiento de las supercélulas permitiría llevar a cabo esa adaptación del factor  $D$  que permitiese un mejor ajuste para los casos de supercélulas observadas en nuestro territorio.

### 3.3.2. Rumbo de las supercélulas

La segunda variable empleada en la verificación del método de Bunkers ha sido el rumbo que siguen las supercélulas en su trayectoria. De forma análoga a lo comentado sobre el cálculo del módulo de la velocidad, la definición del rumbo se ha realizado a partir de las coordenadas de inicio y fin. En este caso, como se puede observar en la Figura 3.22, el método de Bunkers proporciona un mejor ajuste a los datos observacionales ( $\rho \approx 0.90$  en ambos casos, calculado a partir del coeficiente de correlación de variables angulares de Jammalamadaka y Sarma [59]). Los valores de RMSE y sesgo se pueden encontrar en la Tabla 1 en grados para mayor claridad. Es

**Figura 3.22:** Comparación del rumbo previsto mediante el método de Bunkers y el rumbo observado para supercélulas (a) A y (b) B.

interesante comprobar que, en términos generales, tanto las supercélulas ciclónicas como las anticiclónicas se desvían menos respecto al viento medio que lo previsto por el método de Bunkers. El error en la desviación supera en pocos casos los  $45^\circ$ : en un 4 % para las A y un 6 % para las B; mientras que los  $30^\circ$  se superan en un 6 % de los casos para las A y un 13 % para las B.

Este resultado es de interés, puesto que contar con un pronóstico de la dirección de desplazamiento de las supercélulas supone una ventaja durante la vigilancia de fenómenos meteorológicos adversos y permite identificar posibles zonas afectadas.

## 4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se presenta una base de datos de 565 casos de supercélulas identificadas en España durante el periodo 2017–2021. Tras una depuración de duplicidades y de sondeos contaminados, la muestra estadística ha quedado constituida por 497 elementos: 380 supercélulas ciclónicas y 117 anticiclónicas. A partir de este registro, se ha llevado a cabo una caracterización del ambiente convectivo en la formación de sistemas supercelulares en España mediante un modelo numérico no hidrostático de alta resolución, HARMONIE-AROME. Los criterios y la metodología de identificación de supercélulas, que parten de los tradicionalmente empleados en el foro Meteored, pretenden constituir la base de una futura climatología de este tipo de sistemas en España. Una vez creado el soporte metodológico, este sería además extensible a otros modos convectivos de interés en nuestro territorio y a un periodo de tiempo más largo, como el que podría resultar de la disponibilidad de un reanálisis de alta resolución.

El estudio estadístico efectuado se ha sustentado en las distribuciones de diferentes parámetros e índices convectivos que tradicionalmente se han empleado en el estudio de la convección: diferentes tipos de CAPE y CIN, cizalladuras, helicidad relativa a la tormenta y parámetros compuestos. Los valores obtenidos proporcionan una referencia para la vigilancia y la predicción inmediata (*nowcasting*) de fenómenos meteorológicos adversos. En lo referente a la inestabilidad estática, los cuartiles inferiores de las distribuciones de MUCAPE y MLCAPE son, respectivamente, superiores a 580 y 290  $\text{J kg}^{-1}$ ; mientras que los cuartiles superiores de MUCIN y MLCIN se encuentran en torno a 27 y 70  $\text{J kg}^{-1}$ . Al comparar con otros estudios, los rangos de MLCAPE de la BD, con valores medianos de  $\text{MLCAPE-A} = 673 \text{ J kg}^{-1}$  y  $\text{MLCAPE-B} = 640 \text{ J kg}^{-1}$ , se encuentran en las regiones inferiores de las distribuciones presentadas en otras publicaciones, que muestran en general una mayor dispersión. En el caso de MUCAPE, las medianas se corresponden con  $\text{MUCAPE-A} = 1074 \text{ J kg}^{-1}$  y  $\text{MUCAPE-B} = 950 \text{ J kg}^{-1}$ . Destaca el hecho de que una amplia mayoría de los casos registrados (en torno al 98 %) muestra una capa efectiva en su ambiente de formación, y esta suele tener una base de baja altura y un espesor típico que ronda los 1900 m. El cálculo de la helicidad relativa en la capa efectiva, junto con el concepto de cizalladura efectiva, permi-

ten la caracterización del ambiente de formación mediante niveles no arbitrarios. Esta doble naturaleza dinámica y cinemática de estos parámetros sugiere un gran potencial de cara a la predicción operativa.

A lo largo de todo el trabajo, la muestra ha sido estratificada en función del giro del mesociclón propio de cada supercélula. No se han encontrado diferencias significativas en las distribuciones de las cizalladuras en supercélulas ciclónicas y anticiclónicas, y en ambos casos la cizalladura efectiva (de valores medianos CIZE-A =  $14.1 \text{ m s}^{-1}$  y CIZE-B =  $15.1 \text{ m s}^{-1}$ ) presenta una distribución muy similar a la CIZ03. En cambio, la helicidad relativa a la tormenta muestra mayores valores absolutos en supercélulas ciclónicas (medianas de SRH3-B =  $109.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  frente a  $-\text{SRH3-A} = 73.9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  y ESRH-B =  $67.6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  frente a  $-\text{ESRH-A} = 45.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ). Las distribuciones de CIZ06 y SRH3-B son similares a las obtenidas por Rasmussen y Blanchard [19], mientras que los valores de CIZE tienden a agruparse con los de las catalogadas como supercélulas marginales por Thompson *et al.* [27]. Por otra parte, y en consonancia con Bunkers *et al.* [40], la CIZ08 se presenta como indicativo de la duración de los sistemas supercelulares. Las supercélulas de más de 2 horas de duración tienden a mostrar mayores cizalladuras en la capa 0 – 8 km.

Los parámetros compuestos, SCP y STP, aglutinan diversos elementos que intervienen en la formación y el desarrollo de supercélulas. Los valores obtenidos para la BD difieren de manera notable y a la baja con respecto al reportado en [46]. Este hecho invita a una redefinición de los índices ajustando sus factores de ponderación a otros más coherentes con las condiciones convectivas típicas de nuestra región. Un estudio más amplio y de mayor alcance permitiría evaluar de manera más exhaustiva dicha particularización.

La verificación del método de Bunkers para los casos de la BD arroja resultados interesantes para la vigilancia de sistemas supercelulares al predecir su posible desplazamiento. En general, se produce una sobrestimación del módulo de la velocidad de las supercélulas. Sin embargo, y aunque la desviación observada respecto al viento medio es menor a la prevista, la predicción del rumbo presenta mayor calidad. Al hilo de la idea expuesta en el párrafo anterior, la aplicación del método de Bunkers en nuestro territorio se beneficiaría sensiblemente de una calibración *ad hoc*. El parámetro  $D$  empleado en la predicción de la trayectoria de las supercélulas puede ser definido en función de las observaciones incluidas en la BD, e incluso la incorporación de diferentes valores de  $D$  según el giro del mesociclón puede ayudar a minimizar el error cometido en la aplicación del método. Esto afectaría a las distribuciones de helicidades relativas a la tormenta.

Como se comentó al principio de esta sección, la extensión natural de este estudio sería la construcción en AEMET de una gran base de datos de episodios identificados con la que pudieran ser caracterizados todos los modos convectivos de interés en España. Un objetivo a corto plazo, aconsejable para completar el presente trabajo, consistiría en caracterizar el ambiente convectivo en la formación de tormentas ordinarias de carácter no adverso, es decir, tormentas unicelulares

y multicélulas, que son los modos más frecuentes de convección en España. Una comparación de las distribuciones de los índices convectivos entre tormentas supercelulares y ordinarias permitiría discernir si alguno de los índices calculados (como las distintas CAPE, cizalladuras, helicidad relativa a la tormenta o parámetros adimensionales) discrimina entre tipos de tormentas, de manera que se podrían establecer unos umbrales para la formación de supercélulas adaptados a la península ibérica y Baleares, que servirían de referencia en la predicción y vigilancia operativa de estos modos convectivos. Por otra parte, a medio y largo plazo, habría que construir una base de datos en la línea de [31], [60] y [61]. En estos trabajos se recopilaban 22 901 tormentas adversas para el periodo 2003–2011 en EE. UU. Los tres grandes modos convectivos contemplados inicialmente fueron: (1) QLCS (*Quasi Linear Convective System*), (2) supercélulas y (3) convección desorganizada. Cada uno de ellos se subdividió de la siguiente manera: (1) QLCS bien definido en línea y eco en arco; (2) supercélulas RM/LM<sup>10</sup> y discretas, en clúster o en línea; (3) convección desorganizada discreta, en clúster y en línea. Finalmente, se añadieron dos modos menores más: uno situado entre los 1 y 2 anteriores, constituido por QLCS híbridos con supercélulas en línea RM; y otro situado entre el 2 y el 3, conformado por tormentas con características marginales de supercélula, tanto en clúster como en línea. El modo convectivo se asignó a cada caso mediante el examen manual de los datos volumétricos completos de radar. Se determinaron, para cada informe de tiempo adverso, los parámetros derivados del sistema de mesoanálisis del SPC (*Storm Prediction Center*) y el modo convectivo asociado, constituyendo una gran base de datos de sondeos de proximidad para tipos de tormentas conocidos y eventos adversos concretos (tipos de tornados, tamaño de granizo, etc.). Sería de gran valor poder contar con un registro similar en nuestro territorio, que permitiría profundizar en el conocimiento de la génesis y la dinámica de estos sistemas y ayudaría en la difícil tarea de su predicción, al ser una labor crítica por tratarse de fenómenos meteorológicos adversos.

## Agradecimientos

Querriamos agradecer todo el apoyo recibido de Álex Roa Alonso para poder iniciar y llevar a cabo este trabajo. Por otro lado, nos gustaría también agradecer a todas aquellas personas que nos han hecho llegar comentarios y sugerencias que han permitido mejorar considerablemente la calidad y claridad del texto, en particular a José Antonio Gallego Poveda, Manuel Jiménez Cavero, Alicia López Rejas, Cecilia Marcos Martín, David Momblona Montiel, Jesús Riesco Martín, Ismael Sannambrosio Beirán y Carlos Santos Burguete. Por último, no podemos olvidarnos de la comunidad del foro de Meteored, cuya labor altruista ha servido de punto de partida para realizar los cálculos que aquí se han presentado.

---

<sup>10</sup>Nótese que RM y LM se corresponden, respectivamente, con los tipos B y A definidos en este trabajo.

## Referencias

- [1] C. A. Doswell y D. W. Burgess, “Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models,” *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, vol. 79, pp. 161–161, 1993.
- [2] H. B. Bluestein, “Severe convective storms and tornadoes,” *Springer*, vol. 10, pp. 978–3, 2013.
- [3] K. A. Browning, “Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds,” *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 21, no. 6, pp. 634–639, 1964.
- [4] E. N. Rasmussen, J. M. Straka, R. Davies-Jones, C. A. Doswell III, F. H. Carr, M. D. Eilts, y D. R. MacGorman, “Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 75, no. 6, pp. 995–1006, 1994.
- [5] J. Wurman, D. Dowell, Y. Richardson, P. Markowski, E. Rasmussen, D. Burgess, L. Wicker, y H. B. Bluestein, “The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no. 8, pp. 1147–1170, 2012.
- [6] M. L. Grzych, B. D. Lee, y C. A. Finley, “Thermodynamic analysis of supercell rear-flank downdrafts from Project ANSWERS,” *Monthly weather review*, vol. 135, no. 1, pp. 240–246, 2007.
- [7] F. Martín León, J. I. Sanambrosio Beirán, y O. Carretero Porrís, “Supercélula severa en el área mediterránea,” Nota Técnica no. 37, Instituto Nacional de Meteorología, 2002.
- [8] S. Conejo Jorge y F. Elizaga Rodríguez, “Identificación automática de mesociclones y estructuras significativas de viento a partir de datos de radar Doppler,” Nota Técnica no. 43, Instituto Nacional de Meteorología, 2004.
- [9] E. Álvarez Lamata, F. Espejo Gil, F. J. Cortés Rabinad, C. Lafragüeta Pérez, y R. Serrano Notivoli, “Caracterización sinóptica de los procesos convectivos en el interior del nordeste peninsular,” Nota Técnica no. 3, Agencia Estatal de Meteorología, 2011.
- [10] J. Riesco Martín, J. M. Sánchez-Laulhé, P. Aguayo Maldonado, J. d. D. Soriano Romero, F. Polvorinos Pascual, y A. Roa Alonso, “Estudio meteorológico del episodio tormentoso y precipitaciones torrenciales del 16 de agosto de 2010 en Aguilar de la Frontera (Córdoba),” Nota Técnica no. 5, Agencia Estatal de Meteorología, 2012.
- [11] J. A. Quirantes, “Supercélulas en España,” *Revista Tiempo y Clima*, vol. 5, no. 17, 2014.
- [12] J. A. Quirantes, J. Riesco Martín, y J. Á. Núñez Mora, “Características básicas de las supercélulas en España.” Agencia Estatal de Meteorología, 2014.

- [13] J. A. Quirantes, A. López Rejas, J. M. Gutiérrez Núñez, Á. Subías Díaz-Blanco, C. Marcos Martín, J. P. Álvarez Alonso, y J. A. Gallego Poveda, “Caracterización radar de la supercélula tornádica del 2 de octubre de 2013 en Castilla y León [Póster],” in *Sexto simposio nacional de predicción “Memorial Antonio Mestre”*, pp. 609–618, Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- [14] M. Lara Jaén, “Supercélula en un entorno de baja cizalladura,” in *Sexto simposio nacional de predicción “Memorial Antonio Mestre”*, pp. 585–594, Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- [15] J. I. Sanambrosio Beirán, S. Buisán, T. J. Gutiérrez Cobo, J. M. López Pérez, y R. Pascual Berghaenel, “Informe sobre la convección muy organizada y de tipo supercelular del día 1 de julio de 2018 en la provincia de Zaragoza,” Nota Técnica no. 29, Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- [16] J. d. D. Soriano Romero y D. Gutiérrez Rubio, “Estudio múltiple de tornados del 4 de marzo de 2018 en Andalucía occidental,” in *Sexto simposio nacional de predicción “Memorial Antonio Mestre”*, pp. 461–472, Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- [17] C. Jiménez Alonso, C. M. Jiménez Cavero, C. Perea Hitos, y J. Riesco Martín, “Estudio meteorológico de la supercélula tornádica del 26 de agosto de 2019 en Campillos (Málaga),” Nota Técnica no. 33, Agencia Estatal de Meteorología, 2020.
- [18] Y. Martín, M. Cívica, y E. Pham, “Constructing a supercell database in Spain using publicly available two-dimensional radar images and citizen science,” *Annals of the American Association of Geographers*, pp. 1–21, 2020.
- [19] E. N. Rasmussen y D. O. Blanchard, “A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters,” *Weather and forecasting*, vol. 13, no. 4, pp. 1148–1164, 1998.
- [20] M. A. Gómez, “Estudio basado en datos de sondeos atmosféricos del ambiente pre-convectivo asociado a sistemas tormentosos supercelulares en la Península Ibérica.” Curso Magister en Riesgos Climáticos e Impacto Ambiental. Instituto Nacional de Meteorología-Universidad Complutense de Madrid, 2006.
- [21] H. E. Brooks, C. A. Doswell III, y J. Cooper, “On the environments of tornadic and nontornadic mesocyclones,” *Weather and forecasting*, vol. 9, no. 4, pp. 606–618, 1994.
- [22] P. Groenemeijer y A. Van Delden, “Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands,” *Atmospheric research*, vol. 83, no. 2-4, pp. 473–487, 2007.
- [23] R. L. Thompson, R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, y P. Markowski, “Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle,” *Weather and Forecasting*, vol. 18, no. 6, pp. 1243–1261, 2003.

- [24] M. Weisman, M. Gilmore, y L. Wicker, “The impact of convective storms on their local environment: What is an appropriate ambient sounding,” in *Preprints, 19th Conf. on Severe Local Storms, Minneapolis, MN, Amer. Meteor. Soc.*, vol. 238, p. 241, 1998.
- [25] T. T. Fujita, “Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity,” *SMRP Research Paper*, no. 91, 1971.
- [26] R. L. Thompson, C. Mead, y R. Edwards, “Effective storm relative helicity in supercell thunderstorm environments,” in *Preprints, 22 Conference on Severe Local Storms*, Hyannis, MA, 2004.
- [27] R. L. Thompson, C. M. Mead, y R. Edwards, “Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments,” *Weather and forecasting*, vol. 22, no. 1, pp. 102–115, 2007.
- [28] P. Markowski y Y. Richardson, *Mesoscale meteorology in midlatitudes*, vol. 2. John Wiley & Sons, 2011.
- [29] R. L. Thompson, C. Mead, y R. Edwards, “Effective bulk shear in supercell thunderstorm environments,” in *Preprints, 22nd Conference on Severe Local Storms*, Hyannis, MA, 2004.
- [30] L. Bengtsson, U. Andrae, T. Aspelien, Y. Batrak, J. Calvo, W. de Rooy, E. Gleeson, B. Hansen-Sass, M. Homleid, M. Hortal, *et al.*, “The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system,” *Monthly Weather Review*, vol. 145, no. 5, pp. 1919–1935, 2017.
- [31] B. T. Smith, R. L. Thompson, J. S. Grams, C. Broyles, y H. E. Brooks, “Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part I: Storm classification and climatology,” *Weather and Forecasting*, vol. 27, no. 5, pp. 1114–1135, 2012.
- [32] F. J. Calvo Sánchez, D. Martín Pérez, G. Morales Martín, y S. Viana Jiménez, “HARMONIE-AROME, modelo operativo de escala convectiva de AEMET. Parte I: Modelo de predicción y validación,” in *XXXV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, pp. 117–125, Asociación Meteorológica Española, 2018.
- [33] M. J. Bunkers, B. A. Klimowski, y J. W. Zeitler, “P8. 2 the importance of parcel choice and the measure of vertical wind shear in evaluating the convective environment,” 2002.
- [34] H. B. Bluestein y M. H. Jain, “Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 42, no. 16, pp. 1711–1732, 1985.
- [35] R. M. Wakimoto y J. W. Wilson, “Non-supercell tornadoes,” *Monthly Weather Review*, vol. 117, no. 6, pp. 1113–1140, 1989.
- [36] R. H. Johns, J. M. Davies, y P. W. Leftwich, “Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes, 2, variations

- in the combinations of wind and instability parameters,” *GEOPHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, vol. 79, pp. 583–583, 1993.
- [37] M. L. Weisman y J. B. Klemp, “The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy,” *Monthly Weather Review*, vol. 110, no. 6, pp. 504–520, 1982.
- [38] M. L. Weisman y J. B. Klemp, “The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears,” *Monthly Weather Review*, vol. 112, no. 12, pp. 2479–2498, 1984.
- [39] P. Groenemeijer, T. Pucik, I. Tsonevsky, y P. Bechtold, *An Overview of Convective Available Potential Energy and Convective Inhibition provided by NWP models for operational forecasting*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2019.
- [40] M. J. Bunkers, M. R. Hjelmfelt, y P. L. Smith, “An observational examination of long-lived supercells. Part I: Characteristics, evolution, and demise,” *Weather and forecasting*, vol. 21, no. 5, pp. 673–688, 2006.
- [41] M. Taszarek, J. T. Allen, T. Púčík, K. A. Hoogewind, y H. E. Brooks, “Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes,” *Journal of Climate*, vol. 33, no. 23, pp. 10263–10286, 2020.
- [42] F. Martín León, F. Elizaga Rodríguez, O. Carretero Porrís, y J. I. Sanambrosio Beirán, “Diagnóstico y predicción de la convección profunda,” Nota Técnica no. 35, Instituto Nacional de Meteorología, 2007.
- [43] P. M. Markowski, J. M. Straka, E. N. Rasmussen, y D. O. Blanchard, “Variability of storm-relative helicity during vortex,” *Monthly Weather Review*, vol. 126, no. 11, pp. 2959 – 2971, 1998.
- [44] M. Moncrieff y J. Green, “The propagation and transfer properties of steady convective overturning in shear,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 98, no. 416, pp. 336–352, 1972.
- [45] R. Thompson, R. Edwards, y J. Hart, “Evaluation and interpretation of the supercell composite and significant tornado parameters at the Storm Prediction Center,” in *Preprints, 21st Conference on Severe Local Storms*, San Antonio, TX, 2002.
- [46] R. L. Thompson, R. Edwards, y C. M. Mead, “An update to the supercell composite and significant tornado parameters,” in *Preprints, 22nd Conference on Severe Local Storms*, Hyannis, MA, 2004.
- [47] V. A. Gensini, C. Converse, W. S. Ashley, y M. Taszarek, “Machine learning classification of significant tornadoes and hail in the united states using era5 proximity soundings,” *Weather and Forecasting*, vol. 36, no. 6, pp. 2143–2160, 2021.

- [48] F. W. Scholz y M. A. Stephens, “K-sample Anderson–Darling tests,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 82, no. 399, pp. 918–924, 1987.
- [49] S. Engmann y D. Cousineau, “Comparing distributions: the two-sample anderson-darling test as an alternative to the Kolmogorov-Smirnoff test,” *Journal of applied quantitative methods*, vol. 6, no. 3, 2011.
- [50] Y. Martín, “Base de datos de supercélulas en España. 2011-actualidad.” <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=fcae5371111e49c8817a642b4d2cec70>, 2019. [Online; accedido el 26 de septiembre de 2022].
- [51] F. P. Puebla y C. Z. Rodríguez, “Regímenes tormentosos en la Península Ibérica durante la década 2000-2009,” *Revista Tiempo y Clima*, vol. 5, no. 28, 2013.
- [52] J. Á. Núñez Mora, J. Riesco Martín, y M. A. Mora García, “Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España,” Nota Técnica no. 35, Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- [53] C. Calvo, “Caracterización de los ambientes convectivos que favorecen el desarrollo de la convección organizada en España: exploración y evolución en el período 1979–2019 mediante reanálisis ERA5,” Trabajo de fin de Máster, Universidad de Zaragoza, España, 2021.
- [54] M. J. Bunkers, “Vertical wind shear associated with left-moving supercells,” *Weather and forecasting*, vol. 17, no. 4, pp. 845–855, 2002.
- [55] M. J. Bunkers, B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, y M. L. Weisman, “Predicting supercell motion using a new hodograph technique,” *Weather and forecasting*, vol. 15, no. 1, pp. 61–79, 2000.
- [56] M. J. Bunkers, D. A. Barber, R. L. Thompson, R. Edwards, y J. Gardner, “Choosing a universal mean wind for supercell motion prediction.,” *Journal of Operational Meteorology*, vol. 2, no. 11, 2014.
- [57] M. J. Bunkers, “Observations of right-moving supercell motion forecast errors,” *Weather and Forecasting*, vol. 33, no. 1, pp. 145–159, 2018.
- [58] D. S. Wilks, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, vol. 100. Academic Press, 2011.
- [59] S. R. Jammalamadaka y Y. Sarma, “A correlation coefficient for angular variables,” *Statistical theory and data analysis II*, pp. 349–364, 1988.
- [60] R. L. Thompson, B. T. Smith, J. S. Grams, A. R. Dean, y C. Broyles, “Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS tornado environments,” *Weather and forecasting*, vol. 27, no. 5, pp. 1136–1154, 2012.
- [61] R. Edwards, A. R. Dean, R. L. Thompson, y B. T. Smith, “Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part III: Tropical cyclone tornadoes,” *Weather and forecasting*, vol. 27, no. 6, pp. 1507–1519, 2012.