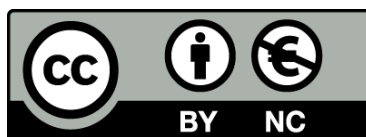




UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# Estudio de sistemas convectivos mesoscalares en la zona mediterránea occidental mediante el uso del radar meteorológico

Tomeu Rigo Ribas



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial 4.0. Espanya de Creative Commons**.

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial 4.0. España de Creative Commons**.

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0. Spain License**.

## 6. El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

### 6.1. *Análisis previo de las imágenes radar*

En el capítulo 2 se indicaban algunos errores comunes a la mayoría de radares, centrándose en los radares de la red del I.N.M. y, concretamente, en el de Barcelona. En este apartado se busca especificar las características que pueden influir en el funcionamiento de las herramientas desarrolladas para el análisis de las estructuras convectivas y estratiformes. Sin embargo, las herramientas no se han desarrollado en función de los posibles errores del radar, sino que se supone que en todo momento la imagen es la óptima (aunque en algunos casos no se ajuste a la realidad), ya que el objetivo de estas herramientas es puramente operativo. Esto significa que cada 10 minutos se obtiene una imagen, que debe ser corregida inmediatamente mediante la máscara de tierra y aplicarse sobre ella las herramientas de identificación y seguimiento. Por lo tanto, ya que el meteorólogo que está observando un episodio de lluvias fuertes precisa de una información actualizada de lo que está ocurriendo, ni el procesado de corrección ni el de los algoritmos aplicados pueden tener una duración excesiva. Además, algunas correcciones son muy útiles para aspectos hidrometeorológicos (especialmente para la obtención de campos pluviométricos precisos), pero pueden tener una aportación negativa si se aplican en tareas puramente meteorológicas, debido a la modificación de ecos de radar que pueden ser en su mayoría anómalos, pero que pueden incluir ecos válidos asociados a estructuras convectivas.

En resumen, se ha pensado en el desarrollo de unas herramientas de identificación de estructuras convectivas dentro de imágenes corregidas parcialmente, contando con la capacidad del meteorólogo para la interpretación de los resultados.

#### 6.1.1. **Identificación de zonas con funcionamiento anómalo del radar meteorológico**

En el capítulo 5 ya se mostraban las zonas que se veían afectadas por los diferentes tipos de errores inherentes o externos y que afectan al radar meteorológico del INM en Barcelona. Ya se han citado tanto los aspectos de zonas de apantallamiento, como el realce de

la señal debido a la propia orografía, o direcciones radiales en las que se observa lo que parece el fenómeno de la propagación anómala.

El estudio únicamente se ha realizado para el CAPPI más bajo, ya que la mayoría de errores se detectan especialmente en ese nivel mientras que en niveles superiores, los problemas con la orografía son menores. Por lo tanto, estos errores influirán directa o indirectamente en la aplicación de los algoritmos de análisis de las estructuras convectivas. En el caso de los algoritmos 2D, ya se vieron los claros problemas que aparecen en las zonas más afectadas, ya que únicamente trabajan con el nivel más bajo.

Los errores en el nivel más bajo suponen un grave contratiempo a la hora de clasificar las estructuras 2D, ya que puede aparecer más (o menos) zonas convectivas/estratiformes de lo que se da en la realidad, provocando que estructuras que deberían ser consideradas como, por ejemplo, Sistemas Convectivos Mesoescalares (SCM) puedan ser confundidas con estructuras menores (especialmente, multicélulas). Además, a la hora de clasificar el tipo de SCM, puede haber una ocultación de parte de la precipitación estratiforme (al encontrarse la parte más activa situada entre el radar y la precipitación más débil), pudiendo ser otra fuente de confusión.

Por lo que se refiere a los algoritmos 3D, los errores en el nivel más bajo no debería suponer un problema tan grande a la hora de identificar las zonas más activas de las células convectivas, ya que los procedimientos consideran el volumen radar completo. Sin embargo, existe un aspecto que hace que la influencia sea mayor de lo que se podría suponer en un principio: la gran mayoría de células identificadas tienen un gran peso en los niveles inferiores, hecho que provoca que los errores también sean notables en este caso.

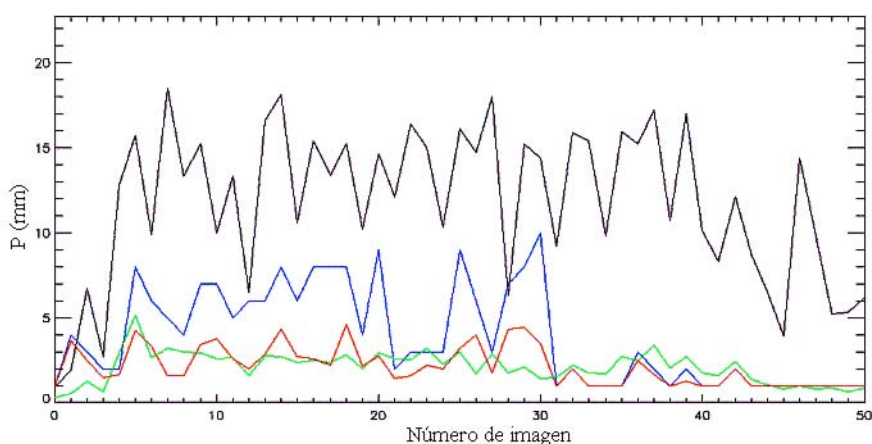
### **6.1.2. Caídas de señal del radar meteorológico y otros problemas**

Al disponer de datos pluviométricos 5-minutales ha sido posible analizar si se ha mantenido la señal del radar durante los episodios. Este método permite detectar caídas de señal muy claras. En la mayoría de episodios analizados han predominado las variaciones apenas imperceptibles. Sin embargo, en algún episodio sí se observó la caída de la señal del radar, siendo el ejemplo más claro el del 10 de junio de 2000. En este caso, la caída de los valores de reflectividad se debió al hecho de que las estructuras convectivas se situaron sobre el propio radar durante un período de tiempo muy importante y la precipitación caída sobre el radar atenuó la señal. Además, es posible que los sistemas de protección del propio radar no pudieran soportar tal cantidad de agua en tan poco tiempo y algún elemento básico en el funcionamiento quedara inutilizado.

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

En la figura 6.1 se muestra gráficamente la evolución pluviométrica del citado episodio, vista desde el punto de vista del radar y de la red de pluviómetros del SAIH del ACA. Puede observarse como si bien la diferencia por lo que respecta a los valores medios (considerándose sólo los datos con precipitación no nula) no es muy significativa (aproximadamente 1 mm de diferencia), los valores del radar se sitúan en todo momento después de la caída, por debajo de los de los pluviómetros. Por lo tanto, una posible manera de identificar las posibles caídas de la señal sería a partir de valores medios del radar inferiores a los de los pluviómetros.

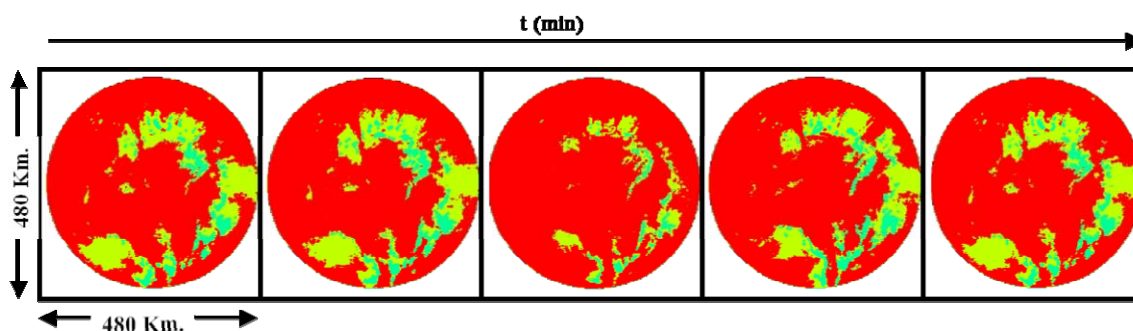
De todos modos, la característica más clara de esta caída se puede ver en la evolución de la precipitación máxima. Mientras que los valores de los pluviómetros se mueven durante un largo período entre los 5 y los 20 mm, los del radar no superan los 10 mm, pero también oscilan entre este valor y los 5 mm. La diferencia entre los valores se debe probablemente a la aplicación de la relación Z/R. Sin embargo, a partir de la imagen 30, aproximadamente, el valor del radar decae de forma espectacular (sin llegar a superar ni los 3 mm), mientras el de los pluviómetros más o menos se mantiene.



**Figura 6.1.** Evolución de la señal del radar meteorológica a partir de los valores máximos (azul) y medios (rojo) de precipitación obtenida a partir de las relaciones Z/R, frente a los valores de precipitación medidos por los pluviómetros del SAIH de las CIC (máximo en violeta y valor medio en verde). Episodio del 9-10 de junio de 2000, a partir de las 21 UTC del día 9.

Como se ha dicho anteriormente, este es el ejemplo más claro de caída de la señal del radar. Ya que las oscilaciones son más difícilmente identificables, y su efecto sobre las imágenes es menor, se considera que prácticamente todas las imágenes pueden ser utilizadas para la aplicación de los algoritmos de identificación de las estructuras convectivas 2D y 3D. Sin embargo, en el siguiente ejemplo (figura 6.2), correspondiente a la evolución de las estructuras de precipitación en una parte del episodio de 14 de septiembre de 1999, se puede

apreciar como en la imagen central las estructuras decrecen de manera bastante notable para volver a un tamaño similar al inicial justo a continuación. La disminución del área se aprecia especialmente en la parte de precipitación estratiforme, aunque también es notable en la parte convectiva.



**Figura 6.2.** Secuencia de imágenes radar para el día 14 de septiembre de 1999, desde las 18:50 UTC hasta las 19:30 UTC. El color celeste indica precipitación convectiva, el amarillo precipitación estratiforme y el rojo píxel sin precipitación.

### **6.2. Identificación y clasificación de estructuras convectivas**

Como se ha comentado previamente, se ha realizado un procedimiento de estudio de las estructuras convectivas. La metodología se puede ver en la figura 6.3, y consiste en el análisis (identificación y seguimiento) de las estructuras de precipitación 2D y de los núcleos de las células convectivas (3D) por separado y, a continuación, uniendo los resultados y los datos del perfil de viento sobre el radar se realiza el proceso de predicción a corto plazo y verificación de los resultados. Además, se realiza una simulación de diferentes situaciones, tratando de desarrollar un sistema de avisos (en un principio únicamente para precipitaciones, pero que se podría aplicar a otros tipos de fenómenos, como puede ser el granizo) y creando una base de datos que permitirá realizar la climatología de las estructuras convectivas.

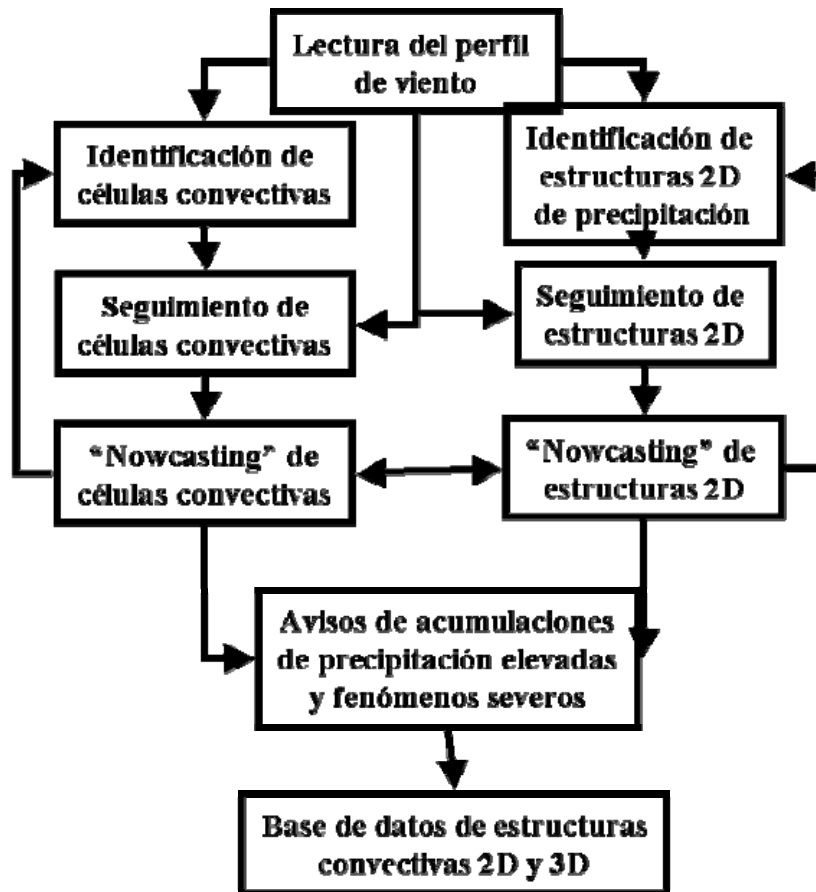


Figura 6.3. Esquema de la metodología aplicada para el estudio de las estructuras convectivas mediante algoritmos aplicados a las imágenes radar

### 6.2.1. Identificación de estructuras de precipitación 2D

Se han identificado un total de 62989 centroides de estructuras 2D mediante el radar de Barcelona, de los cuales un 58.50 % afectaron al territorio de Catalunya. Por lo que se refiere a las Cuencas Internas de Catalunya, la del Llobregat (la de mayor tamaño) es la que registró un mayor número de centroides (8503, un 13.50% del total y un 23.07% de los que se registraron en Catalunya), mientras que la del Besós, también registró un elevado número de centroides (2730), siendo la segunda cuenca donde se observaron más.

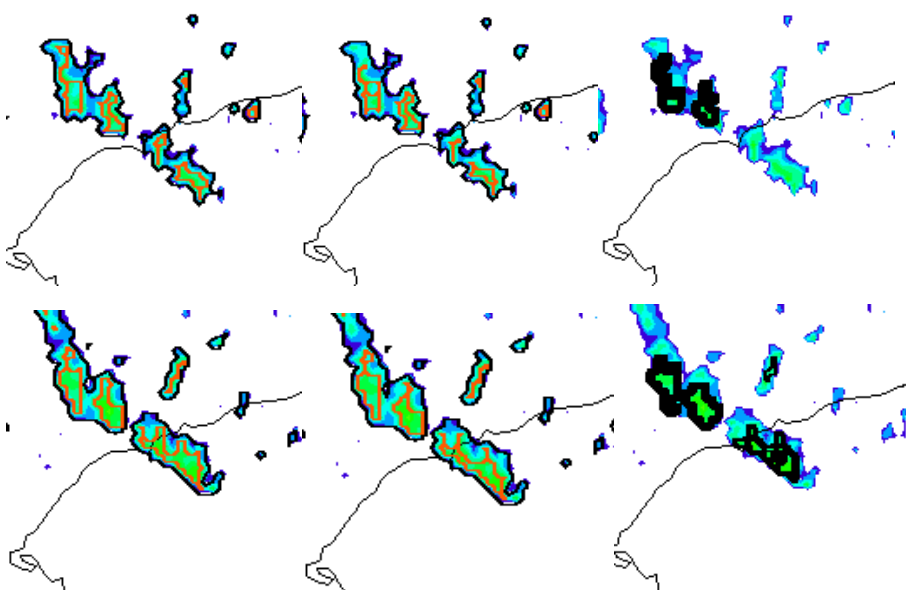
Los datos contienen todas aquellas centroides que fueron identificados, sin considerar ninguna otra característica. En los apartados siguientes se mostrarán las características de las estructuras. El siguiente paso ha sido analizar tanto la posición de todos los centroides como el número de centroides registrados en cada píxel considerando únicamente aquellas estructuras con un área superior a los 100 Km<sup>2</sup>. Se ha obtenido que ambos parámetros están relacionados con los errores del radar y las características de la región: la orografía cercana crea zonas

oscuras donde apenas se identificaron estructuras, mientras que, por otra parte, se puede apreciar una zona donde se identificaron un gran número de estructuras, en el NE del radar (cuencas de Llobregat, Besòs, Ter, Tordera y Maresme).

Para concluir este sub-apartado, se presentan las comparaciones entre los diferentes algoritmos de identificación de las estructuras que se han comparado: el de Steiner, Yuter y Houze (SYH, 1995), la modificación de éste realizada por Biggerstaff y Listemaa (SYHBL, 2000) y, finalmente, el método TITAN (Dixon y Wiener, 1993). Se ha escogido el primero debido a que es el que optimiza mejor la combinación de tiempo y adaptación del fenómeno. Las diferencias entre los dos primeros apenas son perceptibles en la mayoría de casos (figuras 6.4 y 6.5), con una diferencia máxima del 11.94 % entre los píxeles convectivos, por lo que el tiempo utilizado para realizar la segunda parte del algoritmo puede ahorrarse (otra opción es que se aplique solamente bajo ciertas condiciones). Por otra parte, la utilización de un algoritmo como el TITAN que únicamente considera un umbral resulta bastante poco interesante teniendo en cuenta las prestaciones del radar meteorológico, ya que en muchas situaciones no identifica las estructuras o bien considera grandes estructuras como una única, sin tener en consideración que puede tratarse de estructuras claramente diferenciadas. Por lo tanto, a partir de los resultados presentados, el resto del trabajo realizado con las estructuras 2D ha sido desarrollado aplicando la metodología del algoritmo SYH, como ya se había hecho para la identificación de la precipitación en el capítulo anterior.

### 6.2.2. Caracterización de estructuras de precipitación convectiva en 2D

La morfología cambiante de las estructuras convectivas dificulta su análisis. Se puede destacar la interacción entre estructuras, su fusión o la formación de otras nuevas a partir de una inicial, además de los errores del radar. Esto se complica todavía más al hablar de las estructuras de precipitación observadas en el nivel más bajo del volumen radar, ya que la precipitación producida por una estructura cambia de manera importante en poco tiempo (se debe recordar que el intervalo temporal entre dos imágenes es de 10 minutos, que en algunos casos, es la duración de la precipitación de una célula aislada). No es, por lo tanto, extraño que de la gran cantidad de centroides identificados previamente se obtengan únicamente 24931 estructuras de precipitación convectiva, de las cuales sólo el 29.79% tienen una duración superior a una imagen (umbral impuesto para considerar a una estructura 2D como de estudio). Será para estas estructuras para las cuales se ha realizado la caracterización, aunque antes se presentan algunos detalles de las estructuras identificadas en una única imagen.



**Figura 6.4.** Dos ejemplos para el episodio del 9-10 de junio de 2000 de los diferentes algoritmos aplicados (SYH a la izquierda, SYHBL en el centro y TITAN a la derecha) para la identificación de estructuras 2D. Las imágenes de arriba corresponden a la imagen de las 22:30 UTC del día 9, mientras que las de abajo pertenecen al volumen radar posterior a 20 minutos. Cabe decir que el TITAN sólo se aplicó para la parte convectiva de la precipitación (negro, naranja para el SYH y SYHBL), mientras que para los otros dos algoritmos también se identificó la parte estratiforme (que se corresponde con el color negro).

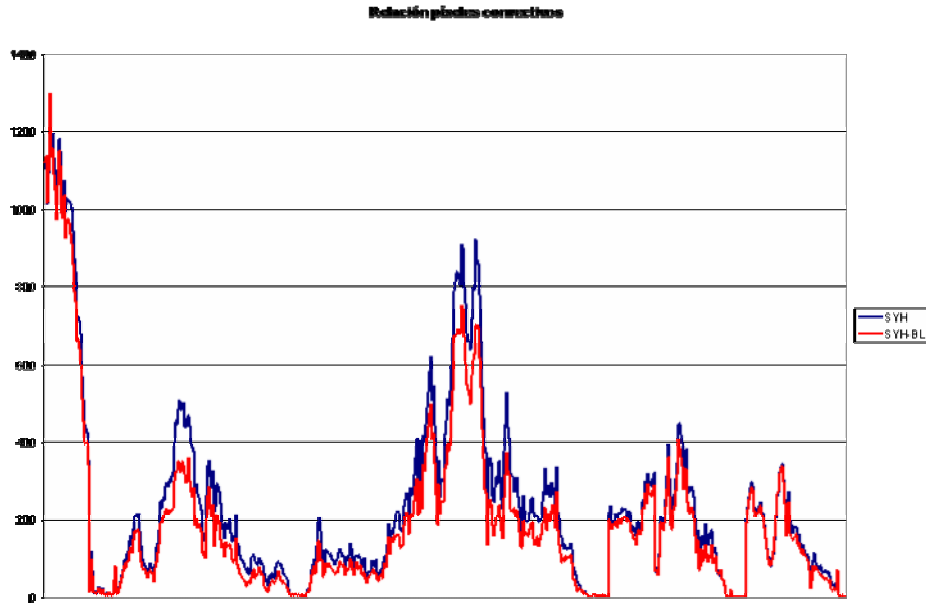
Al presentar estructuras que únicamente se han identificado en una imagen, cabe matizar que esto no implica que su ciclo de vida fuera en todos los casos de únicamente 10 minutos. Un 70.21% del total de estructuras identificadas sólo se ha identificado durante una imagen, aunque como se puede ver en la figura 6.6, existen algunas (37) de ellas que superan los 200 Km<sup>2</sup>, hecho que prueba que bastantes no son identificadas en todo su ciclo de vida, ya que difícilmente con estas dimensiones una estructura puede desaparecer en la imagen siguiente.

Para caracterizar estas estructuras breves se han analizado únicamente aquellas que su área no superó los 50 Km<sup>2</sup>. Esta condición no implica que todas las estructuras que se detectan tengan un ciclo de vida de sólo 10 minutos, pero parece razonable no considerar áreas superiores por el error que podría inducirse. De las estructuras estudiadas en este punto, la gran mayoría (94.94%) no superó los 45 dBz de reflectividad máxima, mientras que el valor del vil-grid no supera los 5 Kg/m<sup>2</sup> en un 85.98%, el 86.32% tiene un ecotop máximo de 8 Km y, finalmente, un 98.10% no supera un valor de precipitación asociado superior a los 3 mm (en 10 minutos). Por lo tanto, la gran mayoría de las estructuras convectivas 2D que no tienen una

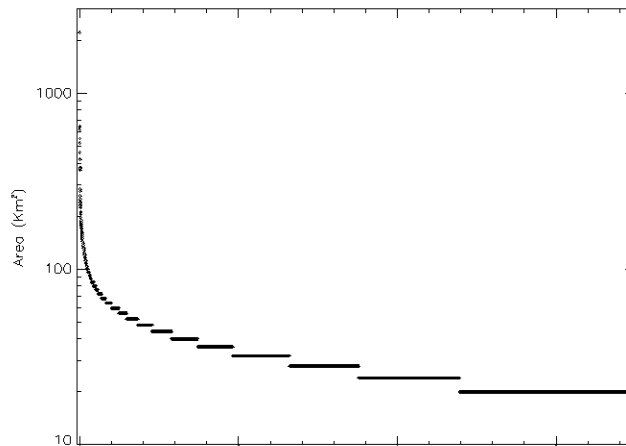


## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

duración superior a los 10 minutos puede decirse que tienen intensidades poco elevadas y un desarrollo vertical no muy importante. Un hecho que soporta esta conclusión es que la gran mayoría de estructuras con reflectividades máximas superiores se sitúan en áreas donde es posible que estén asociadas a errores por realzamiento debido a la orografía (ecos de tierra).



**Figura 6.5.** Comparación de los algoritmos SYH (azul) y SYHBL (rojo) para los píxeles convectivos identificados para un total de 1200 imágenes.



**Figura 6.6.** Área de las estructuras 2D identificadas durante una única imagen, ordenadas de mayor a menor (considerando que el área mínima requerida es de 24 Km<sup>2</sup>).

Por lo que se refiere a las estructuras 2D con un ciclo de vida superior a los 10 minutos (es decir, que han sido seguidas durante más de una imagen), se presentan aspectos

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

---

relacionados con el movimiento, la duración y la evolución de algunos de sus parámetros más representativos (área, reflectividad máxima, VIL...). El movimiento de las estructuras (figura 6.7) revela diferentes características, las cuales se enumeran a continuación:

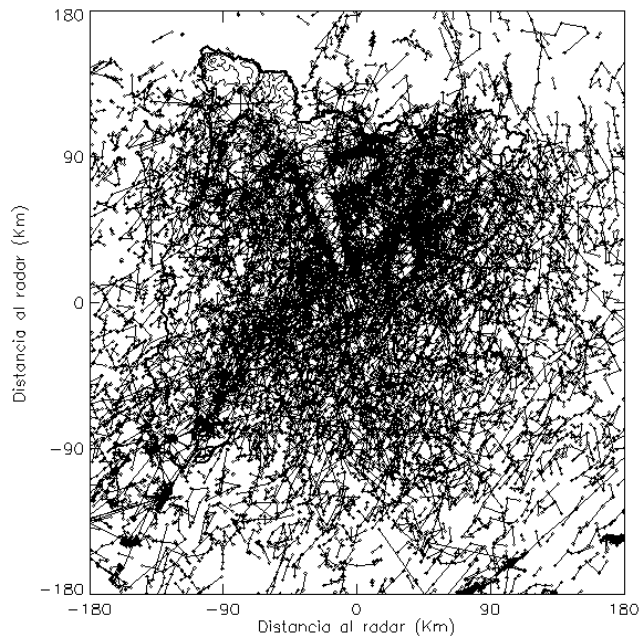
- Las estructuras 2D detectadas sobre el mar tienden a tener un movimiento más lineal que las que se observan sobre tierra firme. Aunque en algunos casos observados parezca que el movimiento de la estructura no es lineal, este efecto se debe a que se ha representado el centroide, el cual tiende a variar mucho más que el propio movimiento de la estructura.
- Las pocas variaciones que se aprecian en el movimiento de las estructuras se pueden deber, generalmente, a la interacción con otras estructuras próximas o bien a una variación en el flujo general que las mueve
- Además de los factores que producen variaciones en el movimiento comentadas anteriormente, en el caso de las estructuras que se observan sobre Catalunya debe incluirse la orografía, que parece que puede provocar diferentes efectos sobre las estructuras (especialmente, desviarlas o ralentizar su movimiento).
- Es bastante habitual observar una variación en el comportamiento (no sólo en el movimiento) de una estructura cuando cruza la costa, tanto para adentrarse en el mar como en tierra firme.

En el apartado 6.4 se tratará el movimiento de los SCM, por lo que aquí únicamente se tratará de manera más superficial. Por lo que se refiere a la distancia recorrida por una estructura 2D, el valor máximo obtenido ha sido de 53.27 Km., mientras que el valor medio se sitúa cercano a los 4 Km. Por lo tanto, las estructuras 2D no tienen un recorrido muy extenso antes de desaparecer. Esto implica que la precipitación convectiva no tiene un recorrido muy largo. La duración media de las estructuras con un ciclo de vida superior a las dos imágenes es de poco más de 30 minutos, con una duración máxima de casi 5 horas, mientras que solamente un 9.98% supera la hora de duración y un 0.24% las 3 horas. Finalmente, se ha dado movimiento de estructuras 2D en casi cualquier dirección (figura 6.7), aunque predominan ligeramente las direcciones E-O y NE-SO.

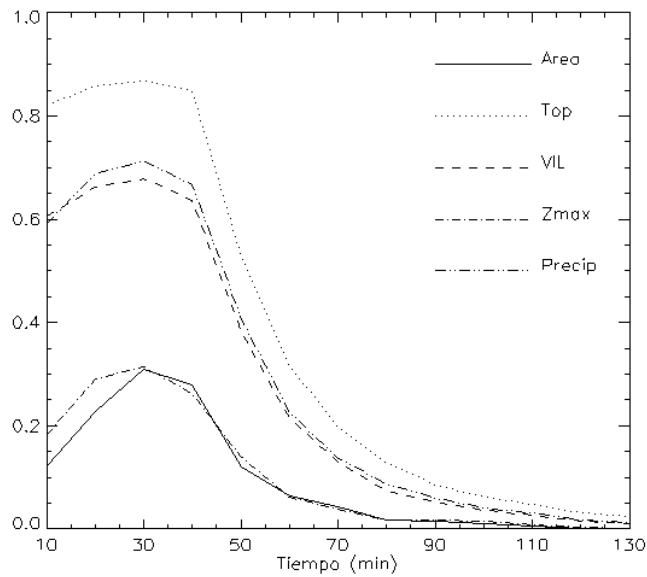
Analizando el ciclo de vida “normalizado” (considerando para los diferentes parámetros un valor normalizado respecto al valor máximo obtenido en cada ciclo de vida) y promedio (considerando todas las estructuras que han superado los 10 minutos de duración) de las estructuras 2D (figura 6.8), se obtiene que para todas las variables consideradas (área, ecotop, vil, reflectividad máxima y precipitación máxima estimada) el valor máximo se da a los 30 minutos, con un notable descenso de la probabilidad que una estructura se desarrolle más allá de los 60 minutos. Este sería, por lo tanto, el modelo a aplicar a las estructuras 2D una vez

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

identificadas, aunque se ha intentado mejorar el modelo considerando diferentes umbrales para las diferentes variables consideradas.



**Figura 6.7.** Movimiento de las estructuras convectivas 2D identificadas en más de una imagen.



**Figura 6.8.** Ciclo de vida "normalizado" en promedio para las estructuras convectivas 2D.

Resulta bastante complejo definir los umbrales para las diferentes variables como indicadores del final de una estructura 2D. Se ha dividido el total de las estructuras en 5 categorías diferentes según el área máxima registrada durante su ciclo de vida. Los valores de

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

los umbrales son: 50, 100, 500 y 1000 Km<sup>2</sup>. En la tabla 6.1 se observa como para los diferentes parámetros (seleccionando únicamente aquellas estructuras que superaron los 30 minutos de ciclo de vida) se aprecian unos comportamientos que se pueden resumir en:

- Los valores del VIL para las dos primeras y la última clase presentan un incremento desde el penúltimo hasta el último valor durante el ciclo de vida de las estructuras (al menos en su valor medio), por lo que podría ser este un comportamiento habitual. Para las dos primeras las diferencias entre ambos valores no son muy significativas, mientras que para la última el incremento es bastante significativo.
- Para todas las clases se aprecia que el valor de la última imagen en la que se identifica la estructura se reduce a la mitad respecto del máximo del VIL
- Para el TOP únicamente se aprecia un incremento en la evolución al final del ciclo de vida en la última clase, siendo la diferencia entre el último valor y el máximo de aproximadamente 1 Km.
- Para la reflectividad máxima, las diferencias entre el último valor del ciclo de vida y el máximo varían desde 1 dBz (para la primera clase) y entre 4 y 6 dBz para las tres últimas clases.
- Finalmente, el comportamiento de la precipitación estimada tiene un comportamiento parecido al del VIL, en referencia a la diferencia entre el máximo y el último valor

	20 ≤ A ≤ 50			50 ≤ A ≤ 100			100 ≤ A ≤ 500			500 ≤ A ≤ 1000			A ≤ 1000		
	t <sub>f</sub>	t <sub>f-1</sub>	max	t <sub>f</sub>	t <sub>f-1</sub>	Max	t <sub>f</sub>	t <sub>f-1</sub>	max	t <sub>f</sub>	t <sub>f-1</sub>	max	t <sub>f</sub>	t <sub>f-1</sub>	Max
VIL	1.95	1.82	2.95	3.61	3.80	5.31	6.30	8.92	14.62	20.11	13.42	36.02	18.98	12.55	41.78
TOP	5.13	5.27	6.60	6.12	6.13	7.17	7.21	7.65	8.79	9.08	9.41	10.41	11.63	11.13	12.38
Zmax	38.09	38.37	40.54	38.11	40.03	42.43	42.40	43.98	47.00	48.11	51.00	54.44	56.33	56.83	60.50
Prec	0.69	0.77	1.00	0.78	1.06	1.48	1.64	1.97	3.09	6.50	8.77	12.69	18.60	20.32	29.17

**Tabla 6.1.** Características de diferentes parámetros (únicamente para estructuras 2D que superaron los 30 minutos de ciclo de vida) clasificados según el área de la estructura.

### 6.2.3. Identificación de estructuras 3D

Para realizar el análisis de estructuras 3D se ha utilizado el algoritmo SCIT, debido a que es el que realiza una mejor identificación. Se ha comparado con otros algoritmos (como el TITAN, considerando todos los niveles, o el GANDOLF), obteniendo siempre mejores resultados, tanto por lo que se refiere a la identificación como al tiempo de ejecución. Un

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

---

ejemplo bastante representativo se tiene en la comparación con el TITAN (figura 6.9), que ratifica las consideraciones ya realizadas referidas a la comparación de estructuras 2D.

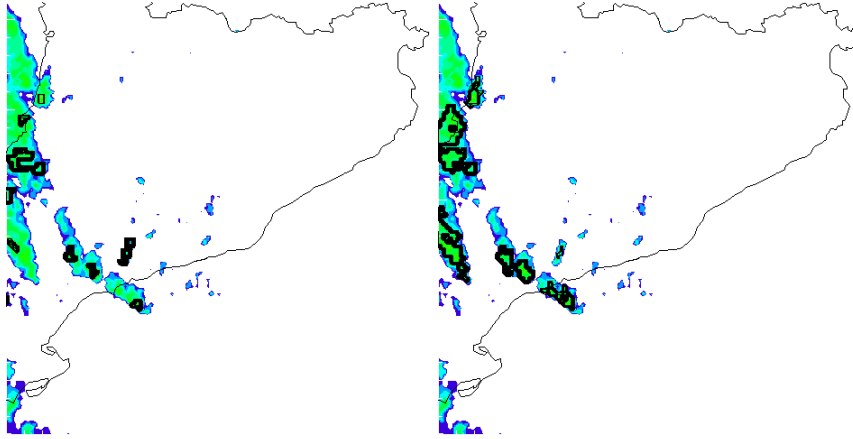
Es importante, sin embargo, tener en cuenta algunos aspectos del algoritmo utilizado, ya que realmente no identifica las células convectivas propiamente como se definen habitualmente, si no el núcleo de éstas. Por lo tanto, el ciclo de vida no es exactamente el que habitualmente se presenta en la bibliografía, ya que sólo se puede identificar (por las características del algoritmo) la célula durante el estado de madurez. Además, como ya se ha dicho anteriormente, tampoco se considera todo el contenido de la célula (sólo la parte más activa). Esto complica mucho el proceso de seguimiento de una estructura 3D entre dos imágenes, ya que en la primera es posible que el umbral de reflectividad necesario para identificar la estructura sea superior al de la imagen siguiente, debido a que la célula puede estar todavía en una fase de desarrollo o bien puede reactivarse por diferentes motivos. De esta manera, una estructura que en una primera imagen ha sido identificada con un volumen bastante grande puede verse reducida en la siguiente y volver a “crecer” en la siguiente, aunque desde el punto de vista de célula convectiva clásica el desarrollo sea totalmente diferente. Por lo tanto, puede implicar que no se consideren como las mismas estructuras.

Se han identificado un total de 8682 centroides en el total de las imágenes analizadas, considerando únicamente aquellas estructuras que se encontraban dentro de un rango inferior a los 140 Km respecto al radar. Se ha considerado esta distancia ya que es, aproximadamente, el rango de mayor validez del sistema de detección remota utilizado. Por lo tanto, no puede hacerse una comparación entre los centroides identificados por el algoritmo 2D con el 3D. Lo que sí se ha realizado ha sido un análisis de las cuencas más afectadas por un mayor número de estructuras 3D.

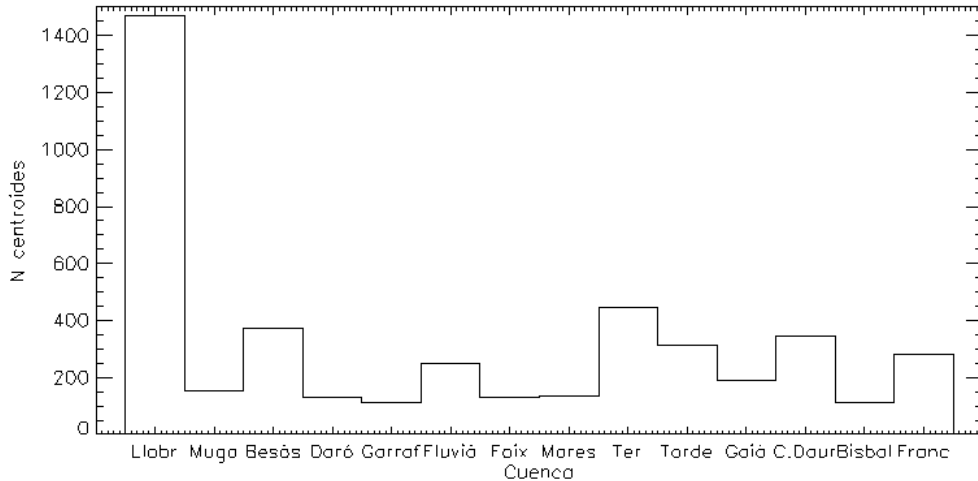
Un 75.99 % de los centroides 3D fueron identificados sobre el territorio catalán, mientras que un 52.52 % afectaron a alguna de las Cuencas Internas de Catalunya, y que son analizadas (las más importantes) en la figura 6.10 A parte de la cuenca del Llobregat (la más grande de las que componen las CIC), que es donde se identificaron un mayor número de centroides (16.91 %) y que destaca sobre el resto, resulta interesante comprobar como la cuenca del Besòs (sobre la que se centraba el proyecto HIDRADMET) se sitúa en tercer lugar (4.31 %), muy cercana a la del Ter (5.16 %), que es una cuenca con una extensión bastante superior. Por lo tanto, parece bastante lógico centrarse en el análisis de la citada cuenca, ya que incluye una gran cantidad de población e infraestructuras y, además, está en las proximidades de Barcelona.

A diferencia de las estructuras 2D, donde se registraron muchos casos que únicamente se identificaron en una imagen, para el caso de las estructuras 3D se identificaron muchas más (44.85 %) con una duración superior a los 10 minutos. Por lo tanto, es posible realizar un estudio del ciclo de vida más preciso, como se verá en el sub-punto siguiente. Esta diferencia

con las estructuras bidimensionales probablemente se deba a que es más difícil identificar situaciones de ecos de tierra y, además, es posible identificar alguna estructura (pocas) donde se produce el bloqueo orográfico (figura 6.11), ya que en ciertos casos en niveles altos el bloqueo no se produce.



**Figura 6.9.** Comparación de los algoritmos (SCIT a la izquierda y TITAN a la derecha) de identificación de las estructuras 3D para el día 9 de junio de 2000 a las 23:00 UTC



**Figura 6.10.** Número de centroides de estructuras 3D identificadas en cada una de las cuencas más importantes de la región analizada.

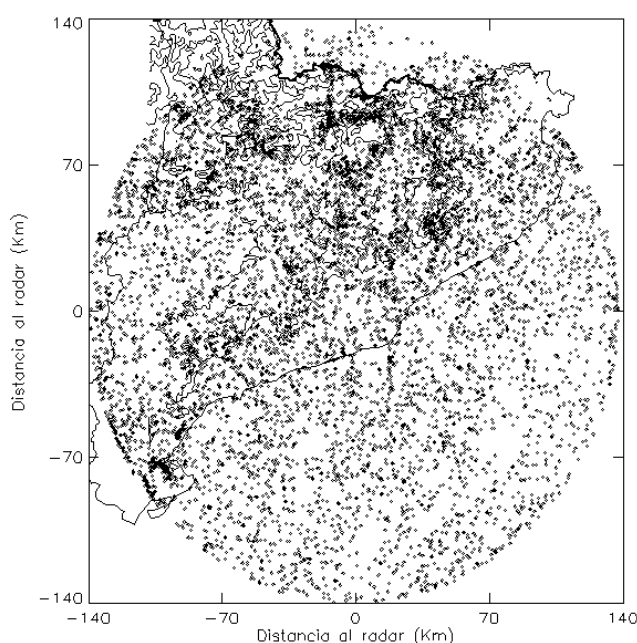
### 6.2.4. Caracterización de estructuras 3D

De manera similar a las estructuras 2D, se ha intentado “modelizar” el ciclo de vida general de las estructuras volumétricas. En este caso se han considerado un mayor número de

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

parámetros, de los que se pueden destacar los siguientes: el volumen, la reflectividad máxima, las alturas de la base, el centroide y la cima de la estructura, el VIL y la densidad de VIL.

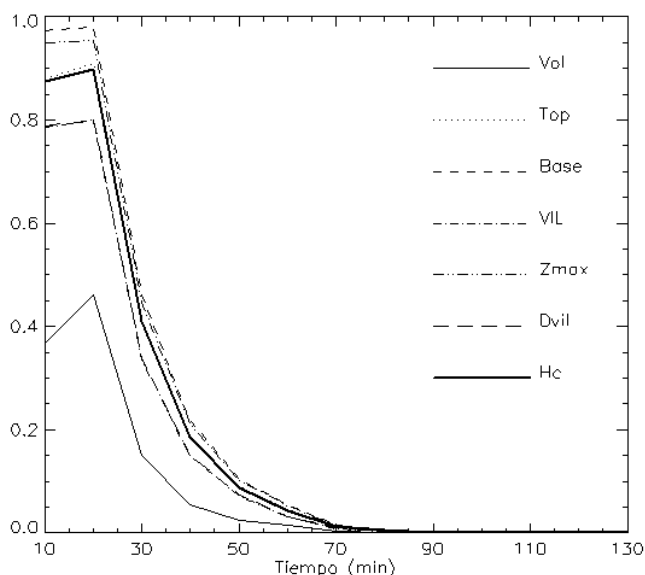
En la figura 6.12 se presenta la evolución “normalizada” de los diferentes parámetros analizados, observándose un comportamiento similar al de las estructuras 2D, aunque con matices claramente diferenciadores. En primer lugar, el máximo de actividad tiende a darse durante una de las dos primeras imágenes en las que se identifica una estructura 3D, produciéndose un notable decrecimiento en las imágenes posteriores (aunque también implica que la probabilidad de identificación de una estructura más allá de las dos imágenes decrece de manera muy espectacular). Además, parece bastante difícil identificar estructuras 3D que se mantengan durante más de 1 hora.



**Figura 6.11.** Posición de los centroides de las estructuras 3D, identificados dentro de un rango máximo de 140 Km.

Las hipótesis relacionadas con la duración presentadas a partir de la gráfica anterior parecen bastante razonables, ya que la duración media de una estructura 3D es de casi 28 minutos, mientras que el máximo tiempo en el que se ha identificado a una misma estructura es de 90 minutos. De hecho, un 52.85 % de las estructuras 3D no superan los 20 minutos, y el 92.77 % de ellas tienen una duración igual o inferior a la hora. Por lo tanto, parece bastante coherente realizar una predicción solamente a una hora vista. Un hecho bastante llamativo es que no se ha encontrado ningún rasgo común que salga de una cierta normalidad para aquellas estructuras que han tenido una duración superior a la hora. Al contrario, se trata de estructuras

de intensidades medias, normalmente poco desarrolladas verticalmente (hasta aproximadamente los 8 Km), aunque con el centroide que podía estar situado a una altura de unos 4 Km, y de dimensiones no muy espectaculares. Además, tampoco son propias de una situación geográfica particular, ya que se dan tanto sobre el mar como encima de tierra, algunas siguen una trayectoria bastante lineal mientras que otras son más erráticas.



**Figura 6.12.** Ciclo de vida “normalizado” en promedio para las estructuras 3D.

Por lo que se refiere al movimiento, la distancia máxima recorrida es de 105.86 Km., siendo el valor medio de 14.48 Km. En la figura 6.13a se puede apreciar como la gran mayoría de las estructuras (95.12%) tienen un desplazamiento entre los 10 y los 30 Km. Aunque se han identificado células con desplazamiento en cualquier dirección, predominan aquellas con movimientos (figura 6.13b) de SE a NO (26.59%), E a O (23.36%) y S a N (16.49%), es decir, desde el mar hacia tierra.

Finalmente, se ha intentado identificar algún hecho que permitiera conocer cuando una estructura puede finalizar el ciclo de vida. Para las estructuras 3D no tiende a darse tanto el proceso de fisión en células hijas o de fusión a partir de otras dos células. No se han considerado las dimensiones (volumen) de la estructura si no la reflectividad máxima para clasificarlas, obteniendo 5 categorías. Se han seleccionado todas aquellas estructuras (tabla 6.2) cuyo volumen máximo (en número de píxeles) se encontraba entre 20 y 200, ya que representan la gran mayoría (83.98%) y los casos no considerados deben tratarse como anómalos. Se han utilizado seis parámetros (Zmax, VIL, densidad de VIL, altura del centroide, altura de la cima,



y altura de la base) para describir el estado final de las estructuras en la última imagen en las que se identifican. A continuación se listan las propiedades de cada una de ellas:

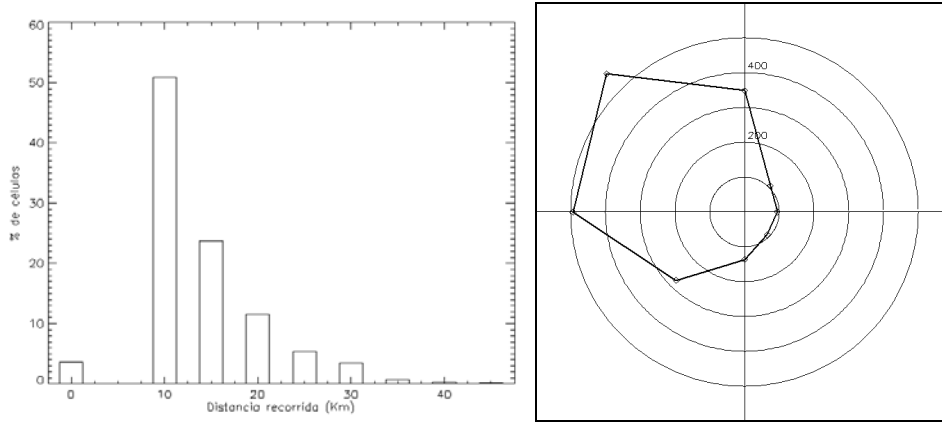
- En el caso de la **reflectividad máxima** se observa que el valor medio de la última imagen suele ser ligeramente superior que el de la penúltima (entre un 0.77 y un 4.92%), excepto en el caso de las estructuras más intensas (donde se aprecia un descenso de un 0.87%). Por lo que se refiere al valor máximo durante el ciclo de vida, cuanto más intensa es la estructura, mayor es la diferencia (hasta un 10.67%), es decir, que más decae la reflectividad.
- Para el **VIL** y la **densidad de VIL**, el comportamiento es bastante similar, excepto para la relación entre el último y el penúltimo valor de la tercera categoría, en el que en la densidad de VIL el penúltimo valor es superior al del último. Este comportamiento es el mismo que en las dos últimas categorías, siendo al revés para las clases menos intensas. El decrecimiento del último valor respecto al valor máximo se incrementa a medida que las estructuras son más intensas, pasando de un aproximadamente 14% hasta un 70%.
- Para la **altura** del centroide y del tope de la estructura se aprecia también una evolución similar, que no se corresponde con la de la altura de la base. Para las dos primeras, únicamente en los casos extremos, la altura de la penúltima imagen es superior a la de la última. Por lo que se refiere a la base, ese comportamiento solamente se distingue en las estructuras más intensas. Respecto al máximo, para  $Z_c$  (altura del centroide) y  $H_t$  (altura de la cima) se aprecia un incremento de la diferencia al aumentar la intensidad de la estructura (que va desde un 10% hasta un 26%, aproximadamente), mientras que para  $H_b$  (altura de la base) el comportamiento resulta diferente, con pocas diferencias entre los valores excepto para las estructuras más intensas (22%).
- Finalmente, el **volumen** de las estructuras en la última imagen es inferior para las dos categorías de estructuras menos intensas, mientras que para el resto el comportamiento es inverso (pasando del -9 hasta el 5%, desde las estructuras menos a las más intensas). Por otra parte, en todas las estructuras existe una diferencia alrededor del 40% entre el valor máximo durante el ciclo de vida al último.

### ***6.3. Tipos de estructuras más habituales según el tipo de episodio***

Un aspecto muy importante a tener en cuenta en los futuros trabajos que se realicen en nuestra región o bien otras áreas del Mediterráneo es que las estructuras convectivas

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

identificadas aquí no presentan siempre las mismas características que las detectadas en los EEUU, por lo que los trabajos realizados allí deben ser considerados, pero tratando de adaptarse a nuestro entorno (donde recordemos existen grandes desniveles orográficos y un mar que en muchas épocas del año se encuentra a una elevada temperatura).



**Figura 6.13.** (a) Distancia recorrida por las estructuras 3D, obtenido a partir del módulo entre la posición final y la inicial. Sólo se han considerado intervalos (de 0 a 5 Km, de 5 a 10, etc.); (b) Dirección del movimiento calculado a partir del ángulo entre la primera y la última posición donde se ha identificado (cada anillo representa un total de 100 estructuras identificadas en esa dirección). Se han tenido en cuenta sólo las direcciones N, NE, E, SE...

	$30 \leq Z_{max} \leq 35$			$35 \leq Z_{max} \leq 40$			$40 \leq Z_{max} \leq 45$			$45 \leq Z_{max} \leq 50$			$Z_{max} \leq 50$		
	$t_f$	$T_{f-1}$	max	$t_f$	$t_{f-1}$	Max	$t_f$	$t_{f-1}$	max	$t_f$	$t_{f-1}$	max	$t_f$	$t_{f-1}$	Max
Zmax	33.20	32.95	33.82	35.93	34.16	37.34	39.85	38.56	41.97	43.54	43.35	46.73	47.88	48.30	52.80
VIL	0.67	0.65	0.76	0.93	0.90	1.16	1.60	1.62	2.12	2.75	2.84	4.02	7.92	8.22	13.62
DVIL	0.12	0.12	0.14	0.17	0.15	0.21	0.25	0.24	0.32	0.39	0.40	0.57	0.87	0.92	1.45
Zc	1.40	1.43	1.51	1.49	1.42	1.65	1.60	1.55	1.83	1.79	1.77	2.12	2.44	2.53	3.07
Ht	2.11	2.20	2.35	2.23	2.14	2.47	2.46	2.41	2.81	2.88	2.86	3.48	4.30	4.38	5.52
Hb	0.89	0.88	0.89	0.91	0.83	0.93	0.86	0.81	0.89	0.85	0.82	0.88	0.87	0.93	1.07
Vol	37.24	40.75	50.84	38.08	39.96	55.37	39.84	39.31	55.83	35.97	35.73	51.05	49.19	46.51	68.59

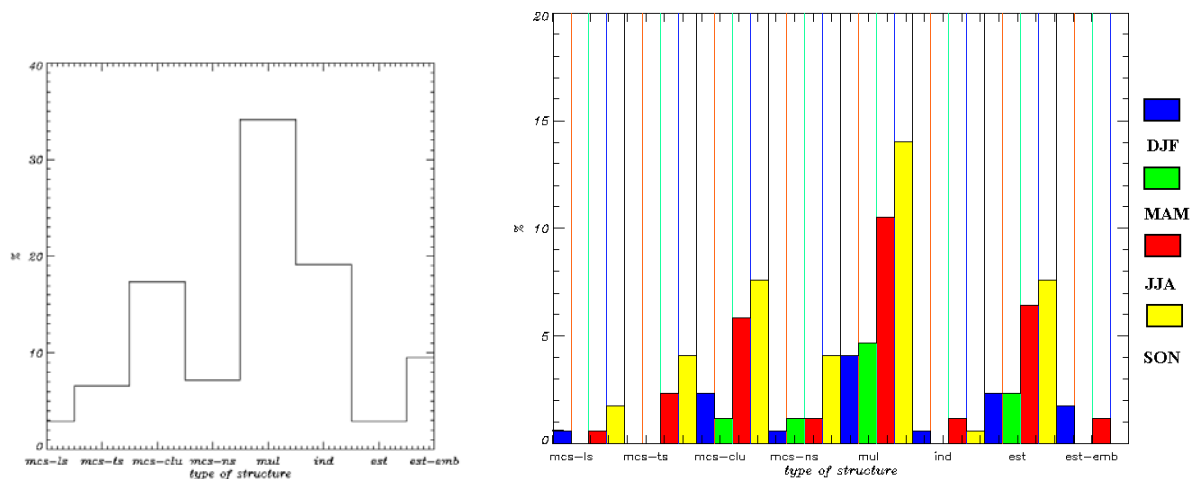
**Tabla 6.2.** Características de diferentes parámetros para estructuras 3D (sólo para aquellas que superaron los 30 minutos de ciclo de vida) clasificados según la reflectividad máxima.

La clasificación que se presenta a continuación se basa en aquella información obtenida a partir del nivel CAPPI más bajo del volumen radar y a partir de las técnicas 2D de superación de un umbral para cada píxel, el cual puede ser clasificado como convectivo, estratiforme, y de no precipitación, como se han presentado en este mismo capítulo (algoritmo SYH). Por lo tanto, se trata de un análisis de la parte más baja del volumen radar.

## Capítulo 6: El uso del radar para el estudio de estructuras convectivas

En las 5000 imágenes analizadas se han identificado un total de 167 estructuras de precipitación (según los modelos presentados en el punto anterior) cada una de ellas caracterizada por la fecha, el tipo de estructura principal detectada y el máximo de precipitación diario acumulado. El objetivo principal de este apartado no es tener una clasificación completa de todas las estructuras de precipitación, si no que está más orientada hacia el análisis de los SCM, que, como ya se ha citado, son las estructuras habitualmente asociadas a los episodios de lluvias fuertes que provocan inundaciones para un área más general. Se debe recordar que los resultados presentados solamente consideran un breve período temporal (1996-2000), que únicamente se han seleccionado episodios de lluvias fuertes (es muy probable que más estructuras convectivas se hayan producido sobre la región analizada durante ese mismo período, aunque sin producir cantidades de precipitación suficiente como para poder ser consideradas), y que, además, no se dispone de todas las imágenes de ese mismo período. Sin embargo, la muestra analizada debería ser suficiente para poder ser representativa en un tanto por ciento muy elevado de la realidad de nuestra región, al menos para situaciones de lluvias intensas.

En la distribución de estructuras identificadas en un mayor número de ocasiones (figura 6.14) se observa un máximo para las estructuras multicelulares (cercano al 35%). Sin embargo, debe notarse que los SCM han sido presentados en cuatro categorías diferentes (CLU, LS, TS y NS). Si consideramos todos los Sistemas Convectivos Mesoescalares, la proporción de éstos es prácticamente igual al de las MUL. Por lo tanto, cabe notarse que en un 70% de las situaciones analizadas predominaba uno de los dos tipos de estructuras.



**Figura 6.14.** Porcentaje de estructuras de precipitación de cada tipo presentado en el punto 6.3.1 (izquierda). Lo mismo pero a partir de un porcentaje estacional (derecha)

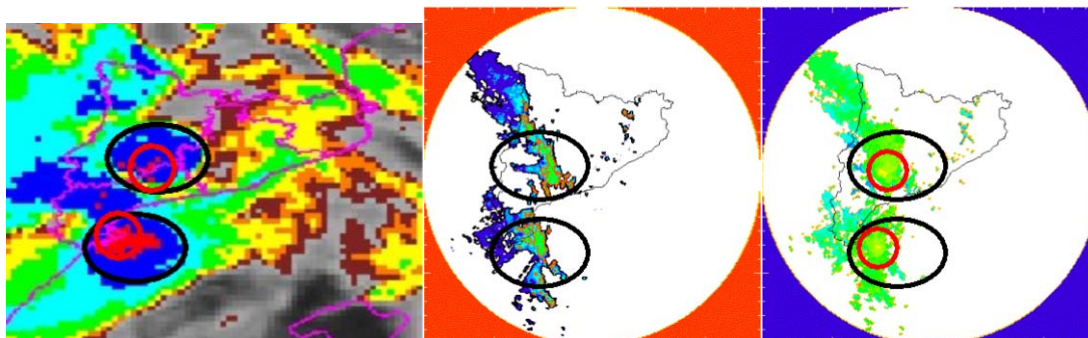
En la distribución estacional de las situaciones (figura 6.14) se presenta un claro incremento de SCM y MUL durante los períodos de JJA y SON. Aunque la mayoría de episodios analizados se encuentran dentro de este período, por lo que se podría suponer que simplemente la relación cambiaría si hubiera más situaciones en los otros períodos estacionales, cabe destacar que en la mayoría de situaciones de DJF y MAM no predominan ni los SCM ni los MUL. Por lo tanto, se puede identificar una correlación entre estructuras más convectivas y los episodios más importantes ocurridos en la región, que generalmente ocurren entre septiembre y octubre, aunque ocasionalmente también pueden darse en agosto o noviembre. Además, es durante esos períodos (Llasat and Puigcerver, 1997) cuando la convección y la precipitación de tipo convectivo son más comunes en Catalunya. Este hecho puede ser observado en el aumento del porcentaje (de aproximadamente un 23% en DEF y MAM a casi el 35% en JJA y SON) de los SCM respecto al total de las estructuras.

### **6.4. Sistemas Convectivos Mesoescalares en los episodios analizados**

#### **6.4.1. Comentarios introductorios sobre SCM en Catalunya**

Existen diferentes maneras de clasificar los SCM, según el punto de vista considerado. En primer lugar, nos encontramos las grandes diferencias que se observan al analizarlos a partir de dos sistemas de teledetección diferentes (satélite y radar), como puede apreciarse en la figura 6.15, ya que el primero únicamente analiza la parte superior, mientras que el radar intenta estudiar la estructura tridimensional interior de las estructuras de precipitación. Es interesante ver como el producto ECHOTOP del radar produce una imagen parecida a la que se observa para el satélite, al menos en la parte donde se identifican los SCM. En nuestra región ya existen algunos trabajos sobre SCM, aunque se refieren exclusivamente al uso del satélite (San Ambrosio et al., 2000, Riosalido *et al.*, 1999).

Aunque, el objetivo inicial del presente trabajo era realizar una herramienta de clasificación de las estructuras de manera automática, debido a errores del radar, ha resultado imposible, ya que ni los criterios de área ni de tiempo se verificaban en casi ningún caso para los SCM (ya que desaparecía temporalmente la señal radar o se producía un notable descenso en su intensidad). Por lo tanto, han debido ser analizadas de manera casi manual todas las imágenes para realizar el estudio.



**Figura 6.15.** Imagen IR realizada con colores de satélite Meteosat (izquierda), campo de reflectividad en el nivel más bajo (centro) y echotop para 12 dBz (derecha) para el 10 de junio de 2000, 00 UTC.

En el capítulo anterior se han analizado los efectos de algunos SCM en superficie, a partir del uso de las estaciones meteorológicas de la XAC, con el objetivo de determinar de manera muy limitada la dinámica de estas estructuras en niveles bajos.

### 6.4.2. Análisis estacional de los SCM

Como ya se ha mostrado en el sub-apartado 6.3.2, los SCM identificados de manera conjunta representan aproximadamente el 35 % del total de estructuras identificadas. En este apartado se analizarán de manera individual las diferentes categorías de SCM identificados (LS, TS, NS y CLU) desde el punto de vista estacional, considerando los períodos que se presentaron en la tabla 4.2 (es decir, MAM, JJA, SON y DEN).

Como ya se citó en el apartado 6.3, se han identificado un mayor número de SCM durante JJA y SON, hecho que en un principio sería bastante normal si se tiene en cuenta que el mayor número de episodios se dieron durante esos períodos. Sin embargo, es para ambas estaciones (y en especial la segunda) donde se registra un mayor promedio de SMC por episodio analizado (1.55 y 1.88 respectivamente), mientras que para las dos restantes los valores son bastante inferiores. Además, cabe remarcar que este incremento se produce para todos los tipos de SCM, aunque es importante remarcar que predominan los CLU (especialmente a partir de mediados de octubre para SON, mientras que para JJA la distribución fue más uniforme) y los TS (destacando que prácticamente todos los registrados en SON se dieron durante el mes de septiembre). Otro hecho interesante analizado es que, para las estructuras organizadas linealmente, se ha identificado una proporción inferior de TS (41 %) con respecto al total si se compara con el trabajo de Parker and Johnson (2000), en el cual el

porcentaje llegaba hasta el 58%, si bien se analizó en ese caso un menor número de situaciones, y, además, para unos meses muy concretos.

Finalmente, por lo que se refiere a los CLU, este tipo de SMC tiene una gran presencia, en cuanto a número de casos registrados durante las cuatro estaciones, superándose siempre el 40% respecto al total de SMC. Sin embargo, destaca DEF como período con un porcentaje superior (67%), frente al mínimo registrado en SON (43%). Probablemente, la falta de una organización de la convección dentro de este tipo de sistemas es una de las posibles causas de que no sean estructuras típicas generadoras de lluvias de fuerte intensidad sostenida.

### 6.4.3. Movimiento y ciclo de vida

Debido a que únicamente se ha utilizado un radar meteorológico para realizar el estudio, existen una serie de ventajas e inconvenientes que condicionan el análisis frente a otros trabajos previos:

- En referencia al uso del satélite, existe una mejor resolución, tanto espacial como temporal, además de tener más información del interior de las estructuras de precipitación. Por lo tanto, podemos conocer mejor el ciclo de vida de un SCM si se utiliza el radar.
- Frente al uso de una red de radares, cabe decir que existe un único sistema de medidas, por lo que las calibraciones sólo afectan al instrumento realizado y no variarán dependiendo del punto analizado. Además, cualquier objeto detectado por el radar se observa de forma diferente según de donde le provenga el haz, por lo que la imagen compuesta puede provocar que un mismo SCM, al pasar a ser identificado por diferentes radares durante su ciclo de vida puede sufrir cambios que no se deben a la propia estructura.
- Sin embargo, existe un punto claramente negativo, que se refiere al rango de detección de las estructuras de precipitación, muy inferior para un único radar (hasta unos 240 Km. desde el radar) que para los otros tipos de sistemas de observación. Esto tiene una clara repercusión en el seguimiento de un SCM, ya que, a menudo, parte de su ciclo de vida puede darse (y de hecho se ha dado en un elevado número de casos del trabajo) fuera del espacio de visión del aparato, por lo que queda incompleto.

En primer lugar, se ha analizado la dirección predominante de los SCM. Como ocurría en el caso de las estructuras convectivas 2D y 3D, estos sistemas tienden generalmente a desplazarse de O a E y de SO a NE, aunque también cabe destacar la dirección S-N. Esta característica también ya fue observada en trabajos previos. En la mayoría de casos, el recorrido

total no queda completamente reflejado dentro de la zona cubierta por el radar utilizado, por lo que este aspecto debería ser analizado en el futuro mediante el uso de una red de radares que incluyera las zonas más próximas a Catalunya.

Si se analiza el período del día (00-06, 06-12, 12-18, y 18-24) en el que se identifican más SMC, se observa como las diferencias no son muy grandes, aunque sí puede remarcarse un máximo (27.95%) justo después del mediodía, siendo el período previo (06-12) aquel en el cual se detectaron menos SCM (22.05%). La explicación a las pequeñas diferencias entre estos intervalos 6-horarios debe encontrarse en la larga duración de muchos de ellos, que excede las 6 horas (incluso en algunos casos las 12), por lo que serán contabilizados en más de uno de los 4 períodos. Sin embargo, si se acota a períodos horarios (figura 6.16), es posible identificar un máximo absoluto alrededor de las 12 UTC, y varios máximos relativos (cerca de las 0, 3, 16 y 21). Se puede decir que el período horario en el cual la probabilidad de identificar un SCM es menor se sitúa entre las 5 y las 9 UTC.

Finalmente, se describen algunas de las características de los SCM identificados en la región. La área máxima detectada (es decir, aquella en la que se superaron los 18 dBz) fue de aproximadamente 69.000 Km<sup>2</sup>, que es más del doble de la extensión de Catalunya. De todas maneras, el valor medio se encuentra en unos 25.321 Km<sup>2</sup>. Estos valores no pueden ser comparados con los de los estudios realizados a partir del satélite, ya que los criterios para establecer el tamaño son completamente diferentes. Por lo que se refiere a la longitud máxima de la estructura en una dirección, el valor máximo fue de 195 Km, con un valor medio de 129 Km. La reflectividad máxima de los SCM fue, en promedio, de 47 dBz, aunque se identificaron varios de ellos con valores por encima de los 55 dBz. Finalmente, la altura máxima donde se superó el valor de los 18 dBz estuvo en promedio cercana a los 11 Km.

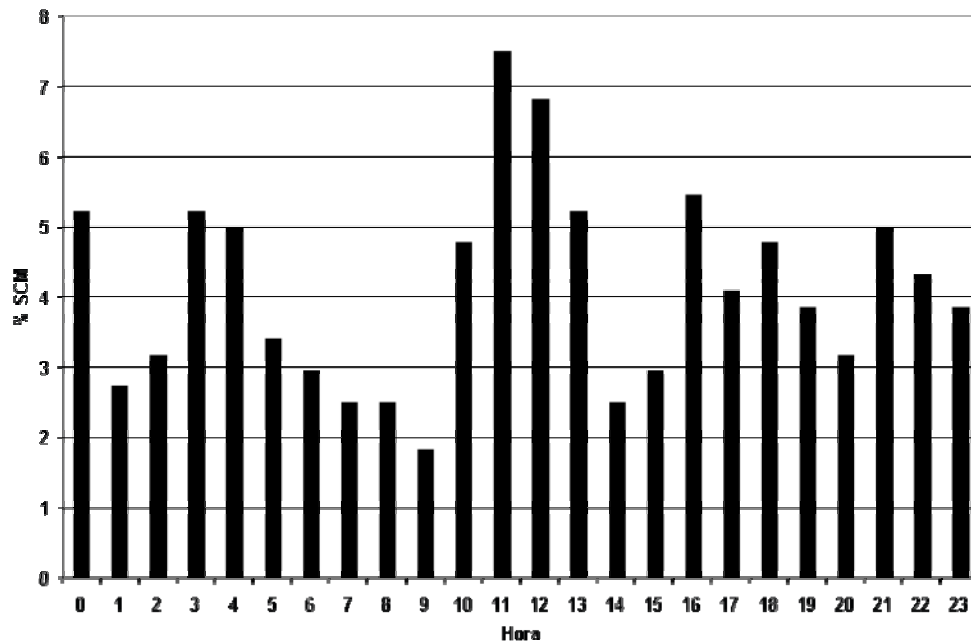


Figura 6.16. Tanto por ciento de sistemas convectivos mesoscalares para cada intervalo horario.

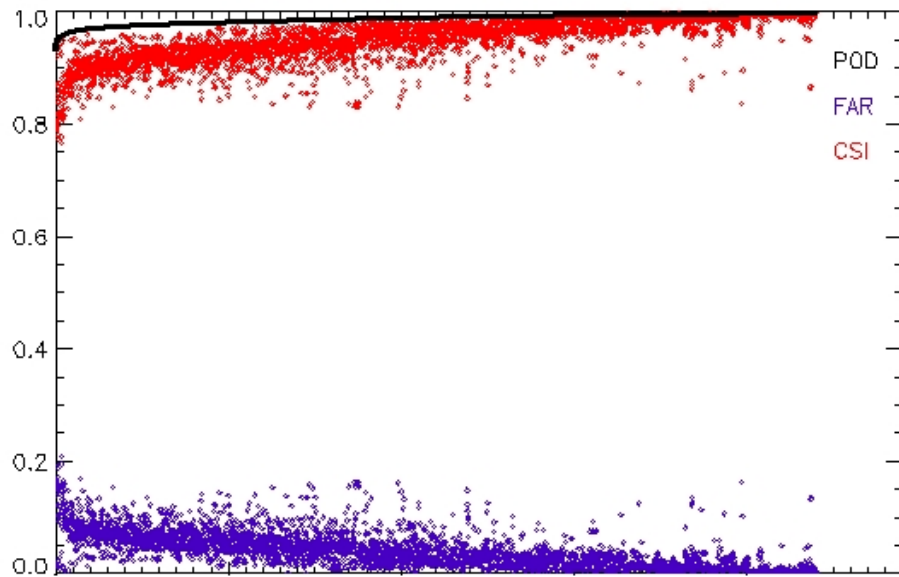
### ***6.5. Aplicación de una herramienta de nowcasting para la predicción del movimiento de las células y estructuras 2D convectivas***

En este último apartado se presentan los resultados de la aplicación de algoritmos para la predicción a corto plazo del movimiento y otras características de los dos tipos de estructuras. En el capítulo anterior ya se ha presentado el uso de la herramienta completa para la obtención del campo de precipitación futuro, presentándose aquí el análisis referente al “nowcasting” del ciclo de vida de las estructuras.

#### **6.5.1. Nowcasting para estructuras de precipitación (2D)**

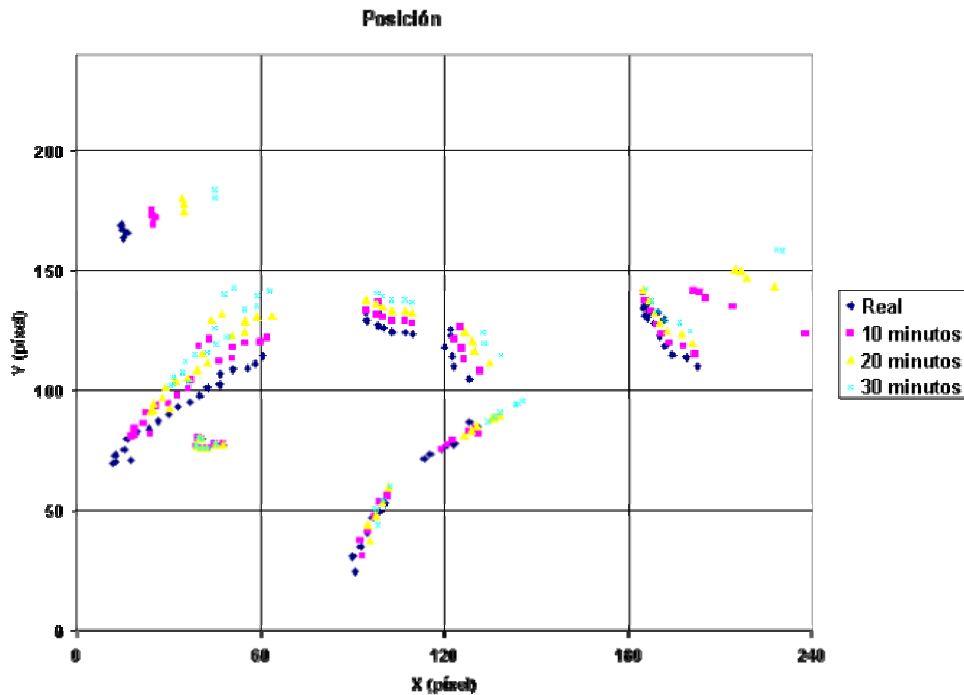
El primer aspecto analizado ha sido la predicción del movimiento de las estructuras de precipitación identificadas mediante el algoritmo 2D. En la figura 6.17 puede observarse como la probabilidad (POD) de predecir que un píxel identificado como de precipitación en la imagen siguiente es bastante elevada (en promedio, 0.99), al igual que el índice de éxito crítico (el CSI alcanza un valor medio de 0.95). Por el contrario, la relación de falsas alarmas (FAR) apenas es perceptible para la mayoría de imágenes analizadas (0.04). Por lo tanto, para predecir el movimiento de las estructuras de precipitación, el algoritmo resulta bastante interesante.





**Figura 6.17.** POD, CSI y FAR para el conjunto de imágenes analizadas (estructuras de precipitación).

Para la parte convectiva de las estructuras 2D (Rigo and Llasat,2002) estos valores son peores (0.78 en el caso del POD, y 0.15 y 0.68 para el FAR y CSI, respectivamente), debido especialmente a que estas estructuras (a veces incluidas dentro de otras estructuras mayores), tienen un ciclo de vida más inestable y más breve. Sin embargo, estos valores pueden considerarse como ciertamente interesantes, ya que la posición futura de la parte más importante de las estructuras convectivas es habitualmente bien predecida. En la figura 6.18 se presentan algunos ejemplos de predicciones de la posición del centroide de estructuras 2D, para 10, 20 y 30 minutos. Para la gran mayoría de estructuras el centroide quedó bien identificado y, solamente para muy pocos casos (15 %) la distancia entre la realidad y la predicción superaba los 15 Km. El valor medio de la distancia entre predicción y observación se sitúa alrededor de los 5 Km., aunque en un gran número de casos (68%) no se superan los 2 Km.



**Figura 6.18.** Ejemplos de predicciones de la posición del centroide de estructuras 2D, para 10, 20 y 30 minutos

### 6.5.2. Validación de modelos de ciclo de vida en estructuras 2D

A partir de las probabilidades de duración de las estructuras 2D presentadas en el punto 6.2.1., se desarrollaron diferentes modelos que fueron aplicados (para simplificar los cálculos) uniformemente a las diferentes variables analizadas, según el umbral que se superaba en cada caso. Uno de los mayores problemas que se presentan es el hecho de identificar el final de la estructura, ya que existen muchos aspectos, no únicamente intrínsecos a ella, sino también externos, que pueden forzar a la desaparición o modificación (de manera que no sea posible identificarla como la misma). En la figura 6.19 se presentan las distintas posibilidades de ciclo de vida desarrollados.

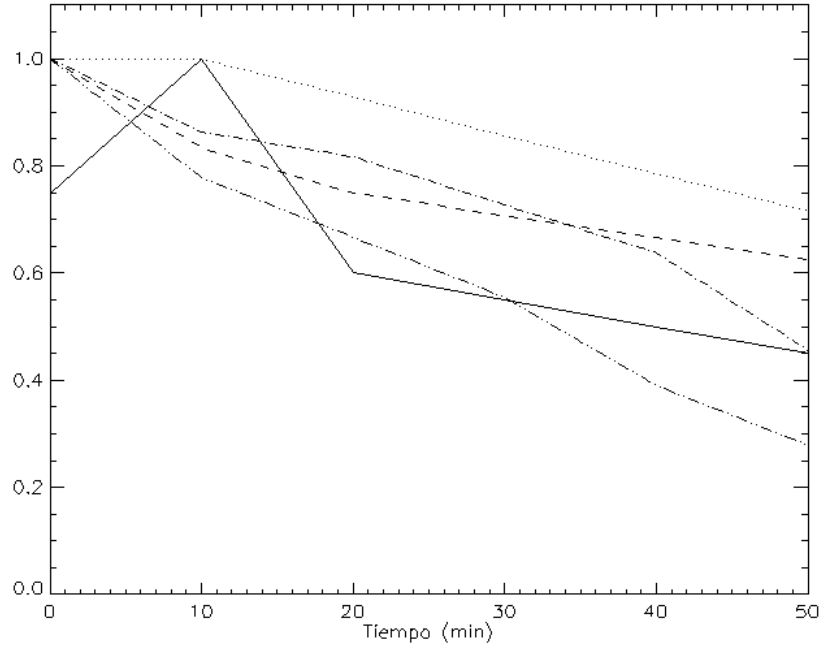


Figura 6.19. Modelos de nowcasting de estructuras 2D según el tipo de estructura identificada

En la figura 6.20 se presentan dos ejemplos de la aplicación del modelo para la reflectividad máxima. Un aspecto común para la gran mayoría de estructuras analizadas es que el valor predicho tiende siempre a ser una sobreestimación del valor observado, aunque las diferencias pueden variar según la estructura: mientras que para el caso (a) las diferencias pueden llegar casi a los 10 dBz, en el (b) los valores son más parecidos. Además, esa sobreestimación suele aparecer a partir de que una estructura sea identificada durante más de 3 imágenes (30'), incrementándose la diferencia a medida que pasa el tiempo.

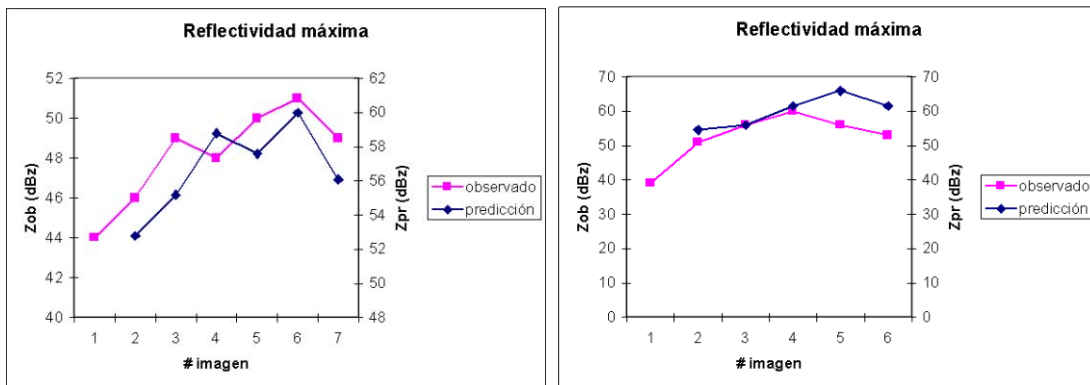
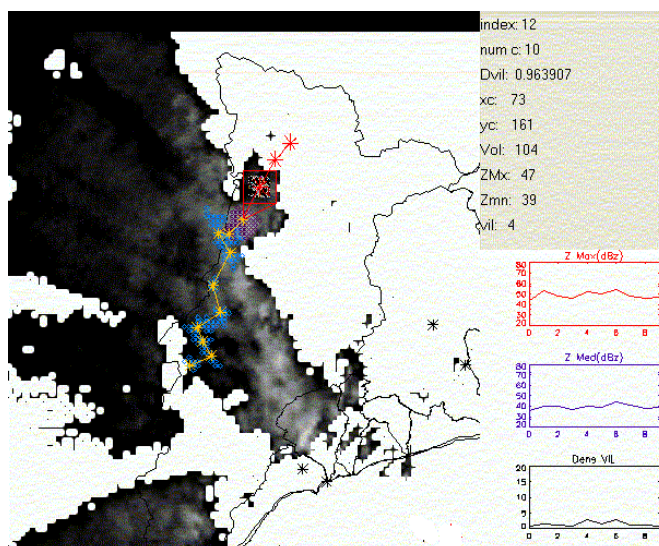


Figura 6.20. Ejemplos de la aplicación del modelo para la reflectividad máxima

### 6.5.3. Predicción a corto plazo para las estructuras volumétricas

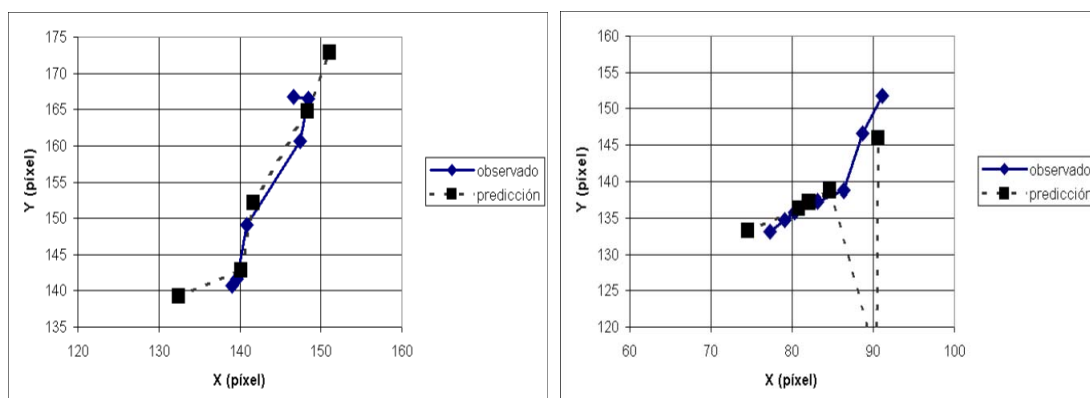
La realización de una validación de estructuras 3D ha resultado mucho más compleja que para el caso de las 2D, en las cuales se podía aplicar diferentes índices bastante habituales en la bibliografía. De hecho, no se ha encontrado ningún trabajo previo en el cual se hubiera realizado una verificación para estructuras con características similares a las presentadas aquí. Por este motivo, se ha realizado una verificación visual de diferentes estructuras (figura 6.21), presentándose aquí algunos ejemplos. En la sub-sección siguiente se presenta una aplicación de los índices de verificación para las estructuras 3D, según si han afectado o no una cuenca de la zona analizada, por lo que puede ser un método más para validar los resultados de este tipo de estructuras.



**Figura 6.21.** Ejemplo de la aplicación del algoritmo de identificación (píxeles marcados en violeta y centroide amarillo), seguimiento (azul y amarillo) y nowcasting (centroides en rojo). La caja que rodea al píxel indica la zona de máxima probabilidad.

El trabajo de análisis de las estructuras 3D se ha realizado con aquellas que han tenido una duración de aproximadamente 1 hora (entre 50 y 70 minutos). Esto ha permitido que el algoritmo presente unos mejores resultados, ya que en la gran mayoría de casos, los mayores errores (o distancias entre observación y predicción) se dan durante las dos primeras imágenes. Como se puede apreciar en las figuras 6.22, la predicción del movimiento tiende a ser bastante parecida a la observada (aunque con algunos errores, como se aprecia claramente en el segundo caso, para la célula identificada a los 20 minutos de su ciclo de vida). Por lo tanto, al menos

para estructuras con un ciclo de vida de más de 30 minutos, la identificación de la trayectoria resulta bastante satisfactoria.



**Figura 6.22.** Ejemplos de predicción del movimiento (negro) frente a la observada (azul), a partir de la posición de los centroides.

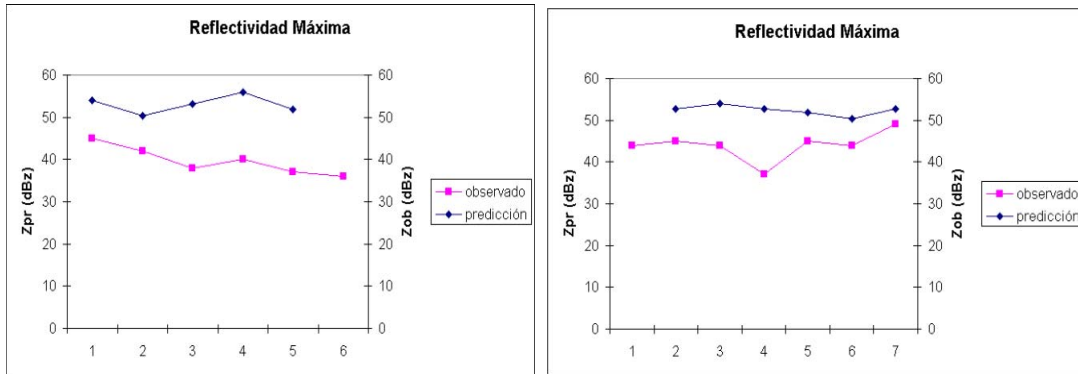
Como en el caso de las estructuras 2D, los parámetros predichos tienden a presentar una sobreestimación (figura 6.23) respecto a los valores observados, con diferencias en este caso que pueden ser realmente importantes, aunque por lo que se refiere a la evolución (es decir, identificación de tendencias) los resultados son bastante aceptables, nuevamente teniendo en cuenta que se tratan de estructuras con ciclos de vida importantes.

### 6.5.4. Validación de los resultados para diferentes cuencas

En esta sección se muestran los resultados de los diferentes parámetros de verificación utilizados (CSI, POD y FAR) a partir de la siguiente hipótesis: si una célula será identificada en la próxima imagen en una cuenca se le asigna un valor uno, mientras que en caso contrario se considera cero. Se trata de un método que puede dar una idea bastante aproximada del grado de acierto del algoritmo 3D. Sin embargo, deben tenerse en consideración algunos aspectos que hacen que los resultados no puedan ser considerados como completamente fiables:

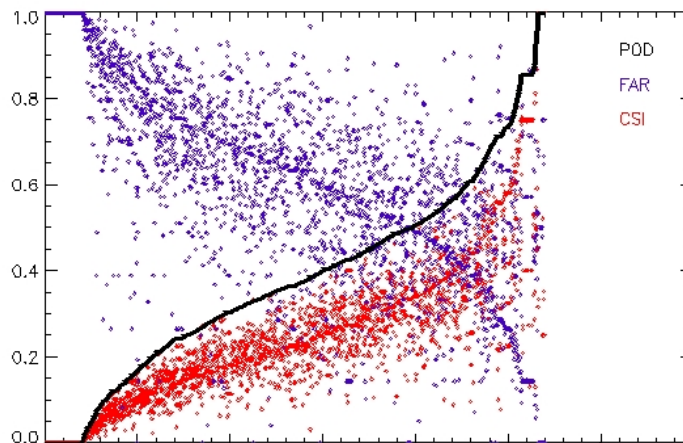
- Como se ha mostrado anteriormente, un tanto por ciento de las estructuras únicamente se identifican durante una imagen, por lo que deberían ser descartadas para este trabajo (esto hubiera implicado un gran esfuerzo, imposible de realizar en un apartado tan pequeño del trabajo)
- No existe un continuo de imágenes, por lo que algunas estructuras dejan de observarse y algunas no han sido predichas

- Una célula puede identificarse justo en el margen de dos cuencas, dejando que en una de ellas no sea considerada, pudiendo ser en la que se había predicho que afectaría. Además, la célula puede quedarse justo al margen de la zona analizada (basta un kilómetro) y ya no se ha considerado que pertenezca a tal.



**Figura 6.23.** Ejemplos de la aplicación del modelo para la reflectividad máxima (estructuras 3D).

Teniendo en consideración los comentarios citados anteriormente, puede apreciarse en la figura 6.24 como pese a no ser unos resultados completamente satisfactorios (especialmente por lo que se refiere a las falsas alarmas), existen un gran número de casos en los que los resultados pueden ser aceptados para trabajos futuros. Probablemente, si se considerasen aquellas células con ciclos de vida largos (de más de 30 minutos), que realmente son las que producen las cantidades acumuladas más importantes, los resultados serían claramente mejores.



**Figura 6.24.** Índices de validación para la predicción de estructuras 3D para el conjunto de cuencas analizadas.