Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2010, **7**, 77–89
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2010.7.07
Revista editada per **ACAM**

# Resultats del model meteorològic WRF-ARW sobre Catalunya, utilitzant diferents parametritzacions de la convecció i la microfísica de núvols

**J. Mercader[1], B. Codina[1], A. Sairouni[2] i J. Cunillera[2]**

[1]Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona
[2]Servei Meteorològic de Catalunya, Berlín 38, 08029 Barcelona

Rebut: 14-IV-2010 – Acceptat: 10-VIII-2010 – **Versió Original**

*Correspondència a:* jmercader@am.ub.es

**Resum**

*El model meteorològic WRF-ARW (Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF) és un model de nova generació que compta amb una creixent comunitat d'usuaris arreu del món. En el marc d'un projecte per a estudiar la viabilitat d'implementar-lo operativament al Servei Meteorològic de Catalunya, s'ha realitzat una verificació dels pronòstics produïts pel model en diversos casos de precipitació observada sobre Catalunya. Precisament, donada la importància dels pronòstics de la precipitació en aquesta zona, un dels principals objectius ha estat l'estudi de la sensibilitat del model a diferents configuracions de les seves parametritzacions de la convecció i la microfísica de núvols. En el present treball, es mostren els resultats d'aquesta verificació sobre dos dominis, un de 36 km de pas de malla i un altre, niat unidireccionalment a l'anterior, de 12 km. En el domini extern, l'avaluació s'ha basat en l'anàlisi dels principals paràmetres estadístics (ME i RMSE) per a la temperatura, humitat relativa, geopotencial i vent, i s'ha determinat que la combinació que utilitza l'esquema convectiu de Kain-Fritsch amb l'esquema microfísic WSM5 ha proporcionat els millors resultats. A continuació, amb aquesta configuració fixada per al domini extern, s'han realitzat pronòstics al domini niat combinant també diferents esquemes de convecció i microfísica de núvols, i s'ha arribat a la conclusió que la configuració amb més encert és la que combina la parametrització convectiva de Kain-Fritsch amb l'esquema de microfísica de Thompson.*

**Paraules clau:** WRF, convecció, Catalunya, microfísica, mesoescala

## 1 Introducció

Durant els darrers anys, s'han utilitzat diversos models meteorològics d'àrea limitada per a les tasques operatives de predicció meteorològica a Catalunya. El Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), per exemple, ha estat treballant amb els models MASS, MM5 i Lokal Modell (Sairouni et al., 2007).

Recentment, i sota el lideratge del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), dels Estats Units, s'ha desenvolupat un nou model meteorològic d'àrea limitada, el *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Es tracta d'un model de nova generació, una de les característiques del qual és la seva doble vessant de model de recerca i de pronòstic. Segons Klemp (2006), un dels objectius del WRF és accelerar la transferència dels avenços en recerca a la meteorologia operativa. Totes aquestes característiques, juntament amb el fet de tractar-se d'un model de lliure distribució, han atret a un gran nombre d'usuaris.

Per aquests motius, es va creure convenient estudiar el comportament del WRF a Catalunya, sobretot pensant en la seva futura utilització operativa. En aquest context, cal tenir en compte el significat pràctic que té el camp de precipitació per a una gran varietat d'usuaris dels pronòstics, des dels mateixos meteoròlegs fins al públic en general (Davis et al., 2006). Precisament, en el cas de Catalunya, una proporció substancial de la precipitació registrada prové de núvols convectius, arribant a representar el 70-80% del total de precipitació caiguda a l'estiu (Llasat i Puigcerver, 1997) i en l'àmbit geogràfic del Mediterrani Occidental, la majoria

*2010 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".*

**Taula 1.** Llista de tots els casos d'estudi, amb el nombre d'instants d'inicialització i el nombre total de simulacions realitzades per cada cas. El nombre de simulacions respon a les 6 configuracions provades per cada instant d'inicialització, resultants de la combinació de dos esquemes de microfísica de núvols amb 3 opcions per a la parametrització de la convecció.

| Casos d'estudi (AAAA/MM/DD) | Nombre d'instants d'inicialització | Nombre de simulacions |
|---|---|---|
| 2006/06/15-16 | 4 | 24 |
| 2006/07/05-06 | 4 | 24 |
| 2006/08/23-25 | 6 | 36 |
| 2006/09/12-16 | 9 | 54 |
| 2006/09/24 | 2 | 12 |
| 2006/10/11-12 | 3 | 18 |
| 2006/10/17-20 | 7 | 42 |
| 2007/02/08 | 2 | 12 |
| 2007/02/17 | 2 | 12 |
| 2007/03/07 | 2 | 12 |
| 2007/03/16 | 2 | 12 |
| TOTAL | 43 | 258 |

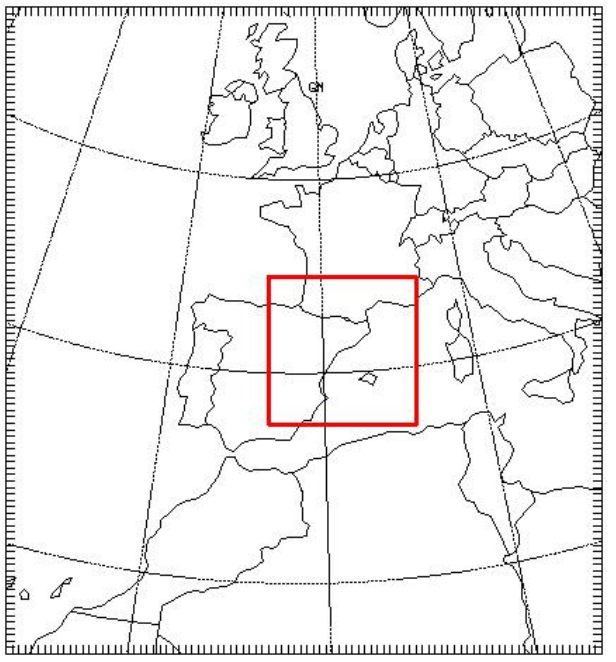

**Figura 1.** Domini de 36 km de pas de malla amb el domini niat de 12 km indicat amb el quadre interior.

d'episodis de precipitacions extremes i d'inundacions són causades per episodis convectius (Llasat, 2001).

Donada la importància que tenen els fenòmens convectius a Catalunya, i el conseqüent interès en obtenir el millor encert possible en els pronòstics de precipitacions, l'estudi s'ha centrat en avaluar la sensibilitat del model a diferents combinacions de les parametritzacions de la convecció i de la microfísica de núvols, amb l'objectiu de trobar, d'entre totes elles, la configuració amb més encert en el pronòstic de diverses variables. Concretament, s'han estudiat les simulacions del model per a un conjunt d'onze casos d'estudi, combinant els tres esquemes convectius disponibles a la versió 2.2 del WRF amb dos esquemes de microfísica: el conegut com a WSM5 (Hong et al., 2004) i el de Thompson et al. (2004).

En aquest sentit, s'ha optat per limitar el nombre de possibles combinacions d'esquemes físics disponibles al model per tal d'avaluar diversos casos d'estudi i, d'aquesta manera, augmentar la representativitat dels resultats respecte als que s'obtindrien si se'n consideressin uns pocs. Conseqüentment, no s'han dut a terme estudis de sensibilitat a altres parametritzacions físiques que també haurien estat de gran interès per al disseny de la configuració operativa del WRF a Catalunya, sobretot els esquemes de capa límit (PBL) i de processos superficials. Precisament, Wisse i Vilà-Guerau de Arellano (2004) demostraren que els esquemes de PBL tenien un gran impacte en els camps de pluja simulats pel model MM5 en l'estudi d'un cas de precipitació convectiva severa també a Catalunya.

Recentment, i sobretot en l'àmbit geogràfic dels Estats Units, s'han dut a terme estudis similars, en els quals s'ha avaluat la sensibilitat del camp de precipitació pronosticat pel WRF a diferents configuracions de les parametritzacions físiques, entre les quals es troben les de la convecció i la microfísica de núvols (Koo i Hong, 2008; Jankov et al., 2007; Gallus i Bresch, 2006); no obstant això, també proliferen els treballs amb dominis d'alta resolució, com ara els de Kain et al. (2005), Kain et al. (2006), Otkin et al. (2006), o bé Weisman et al. (2008), en els quals s'opta per un tractament explícit de la convecció, de manera que l'esquema convectiu queda al marge dels estudis de sensibilitat. Pel que fa a l'àmbit geogràfic de Catalunya, no es coneix cap treball que avaluï la sensibilitat dels pronòstics a la configuració del model WRF per a les variables que s'analitzen en el present treball. De totes maneres, cal destacar dues publicacions recents que verifiquen els pronòstics del WRF per a diverses variables superficials (com temperatura i humitat a 2 metres o vent a 10 metres), en una de les quals es comparen els resultats dels pronòstics produïts pels dos nuclis dinàmics del model (ARW i NMM) sobre Europa (Jorba et al., 2008) mentre en l'altra s'analitza la sensibilitat a un conjunt de 23 configuracions del model WRF sobre la Península Ibèrica (Borge et al., 2008).

A la secció següent, es detallen els casos d'estudi seleccionats i, seguidament, es fa una descripció de la configuració del model utilitzada per a l'execució de les simulacions. A la secció 4 s'explica la metodologia de la verificació i a la secció 5 s'exposen i s'avaluen els resultats. El darrer apartat és dedicat a les conclusions i a les línies futures de treball.

**Taula 2.** Principals característiques dels dominis i les dades inicials i de contorn.

| | Domini extern | Domini niat |
|---|---|---|
| Pas de malla horitzontal | 36 km | 12 km |
| Dimensions (X, Y, Z) | 94, 102, 31 | 70, 70, 31 |
| Pas de temps | 216 s | 72 s |
| Condicions inicials | GFS $1^\circ \times 1^\circ$, pronòstic + 12 hores + assimilació (via 3DVAR) de METAR i radiosondatges | |
| Condicions de contorn (CC) | GFS $1^\circ \times 1^\circ$ Pronòstics inicialitzats 12 hores abans | Pronòstics WRF domini extern |
| Freqüència de CC | 6 hores | 216 segons |

**Taula 3.** Parametritzacions físiques (fixes i variables) utilitzades en les simulacions.

| Parametritzacions variables | Parametritzacions fixes |
|---|---|
| Convecció: | Superfície: |
| - Kain-Fritsch (KF) | - NOAH LSM (4 capes de subsòl) |
| - Betts-Miller-Janjic (BMJ) | PBL: |
| - Grell-Devenyi (GD) | - YSU |
| Microfísica: | Capa superficial: |
| - WRF Single Moment 5-class (WSM5) | - Monin-Obukhov (MM5) |
| - Thompson | Radiació: |
| | - Dudhia (ona curta) i |
| | - RRTM (ona llarga) |

## 2 Casos d'estudi seleccionats

Per a l'avaluació del model es van seleccionar 11 casos d'estudi (Taula 1) compresos entre el 15 de juny de 2006 i el 16 març de 2007, durant els quals es van observar pluges sobre Catalunya, algunes d'elles de caràcter clarament convectiu.

D'entre aquests episodis, en destaquen dos de gran impacte: el del 25 d'agost de 2006, en què una tempesta aïllada provocà una riuada que arrossegà nombrosos cotxes a la riera de Calella, al Maresme, i l'episodi comprès entre el 12 i el 16 de setembre de 2006, durant el qual molts observatoris registraren acumulacions diàries superiors als 100 mm (Mercader et al., 2007). El mateix episodi de setembre també ha estat estudiat a fons per Mateo et al. (2009).

## 3 Disseny de les simulacions

### 3.1 Configuració dels dominis

Les simulacions s'han executat sobre 2 dominis (Figura 1) idèntics als utilitzats a l'SMC per als pronòstics operatius del model MM5 (Sairouni et al., 2007) de cara a facilitar, en un futur, la comparació entre el funcionament del WRF i l'MM5. Les característiques dels dos dominis: l'extern, de 36 km de pas de malla, i l'intern, niat a l'anterior, de 12 km, s'especifiquen a la Taula 2. Per a ambdues graelles s'utilitza el conjunt de 31 nivells verticals definit per defecte pel model WRF-ARW (Wang et al., 2007).

### 3.2 Dades inicials i de contorn

Tal com s'especifica també a la Taula 2, les condicions inicials i de contorn del domini extern s'obtenen dels pronòstics del model global GFS ($1^\circ \times 1^\circ$ de resolució horitzontal) inicialitzats 12 hores abans de l'hora d'inici de la simulació. El camp inicial, que correspon a un pronòstic a 12 hores del GFS, es millora mitjançant l'assimilació de dades observacionals (METAR i radiosondatges) amb el mètode 3DVAR (Barker et al., 2004). Les condicions de contorn del domini niat són interpolades des del domini exterior amb un període igual al pas de temps d'integració del domini extern.

### 3.3 Configuració de les parametritzacions físiques

Atès que l'objectiu del treball és avaluar el comportament dels pronòstics del WRF en funció de la parametrització de la convecció i la microfísica de núvols, per a cada instant d'inicialització s'han efectuat diverses simulacions mantenint fixes les parametritzacions de la radiació, capa superficial, subsòl i capa fronterera, i variant els esquemes convectius i de la microfísica de núvols.

La Taula 3 sintetitza totes les opcions de la física utilitzades en les simulacions, tant les variables com les fixes. Aquestes darreres s'han escollit, per una banda, respectant les que tenen una versió anàloga o precedent en el model MM5 que sigui utilitzada en la configuració operativa de l'SMC, i per altra banda, tenint en compte els resultats d'altres investigadors que han treballat amb el WRF.

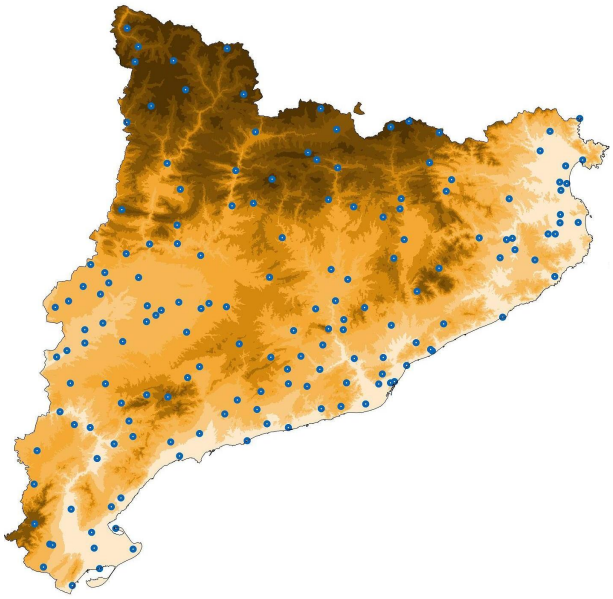

**Figura 2.** Pluviòmetres de la xarxa d'estacions meteorològiques automàtiques de l'SMC.

En el cas concret de la capa fronterera (PBL) , es disposa de 3 esquemes a la versió 2.2 del model: en primer lloc, la parametrització del *Medium Range Forecast model* (MRF) descrita a Hong i Pan (1996), i implementada també al model MM5, però se'n preveu la seva desactivació al WRF (Wang et al., 2007); en segon lloc, l'esquema de PBL de la *Yonsei University* (YSU), desenvolupat per Hong et al. (2006) com una revisió de la parametrització MRF, i finalment, l'esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ). Per aquest estudi s'ha fixat l'esquema YSU perquè es tracta de la nova generació de l'esquema MRF, utilitzat pel model MM5 a l'operativa de l'SMC. Per als processos de superfície, cada opció de parametrització va lligada a un esquema de PBL (Skamarock et al., 2005), de manera que a YSU li correspon la parametrització basada en la teoria de semblança de Monin-Obukhov desenvolupada originalment per al model MM5.

La combinació de tots els esquemes variables dóna 6 possibles configuracions que es poden definir tal com s'anomenen a la Taula 4.

Finalment, és important destacar que el treball de verificació va constar de dues etapes ben definides: en primer lloc es van dur a terme les proves per a determinar la configuració òptima per al domini extern, i un cop trobada, es van efectuar les proves per al domini intern, de manera que les condicions de contorn proporcionades des del domini exterior provenien de la configuració seleccionada.

## 4 Metodologia de la verificació

### 4.1 Domini extern ($\Delta x$ = 36 km)

En el domini de 36 km s'ha verificat el pronòstic de la temperatura, la humitat relativa, l'altura geopotencial i la velocitat del vent mitjançant el càlcul de l'error mitjà (ME), que serveix per a determinar si el model, en conjunt, presenta algun biaix en el pronòstic d'aquestes variables, i de l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà (RMSE), que es pot interpretar com la magnitud típica de l'error (Wilks, 1995), ja que manté les unitats de la variable avaluada. Per al vent també s'ha determinat la mitjana del mòdul del vector error del vent (MVWE), que es defineix segons:

$$MVWE(i,j) = \frac{1}{N_i N_j} \sum_i \sum_j VWE(i,j) \quad (1)$$

on:

$$VWE(i,j) = \\ = \sqrt{[u_F(i,j) - u_A(i,j)]^2 + [v_F(i,j) - v_A(i,j)]^2} \quad (2)$$

on $N_i$ i $N_j$ són les dimensions $X$ i $Y$ de la malla, respectivament, $u(i,j)$ i $v(i,j)$ són els components del vent al punt de malla $(i,j)$ i els subíndexs $F$ i $A$ fan referència, respectivament, als camps pronosticat i analitzat. Per a calcular tots aquests índexs s'han seguit dos mètodes: la verificació malla a malla i la verificació punt a punt.

Concretament, el primer mètode ha consistit en comparar, per a cada variable, els valors pronosticats amb els valors analitzats. Aquests darrers s'han obtingut a partir de la interpolació al domini extern dels camps procedents de l'anàlisi del model GFS (FNL-GFS), millorats amb la ingestió de dades observacionals amb el WRF-3DVAR. Com a resultat d'aquesta comparació s'han calculat, per una banda, els valors dels índexs estadístics en cada un dels punts de la malla, i per altra banda, els valors mitjans d'aquests índexs sobre tot el domini extern.

En la verificació punt a punt, en canvi, els valors previstos de cada variable en els nivells verticals estàndard s'han verificat respecte de les observacions proporcionades pels radiosondatges procedents de totes les estacions compreses dins del domini.

Mentre la verificació malla a malla permet disposar tant d'uns valors globals dels diferents índexs estadístics sobre tot el domini com d'una distribució espacial de l'error, la verificació punt a punt té l'avantatge de possibilitar la comparació directa de la sortida del model amb les observacions.

### 4.2 Domini intern ($\Delta x$ = 12 km)

En el cas del domini intern, l'encert dels pronòstics de temperatura, humitat relativa i vent s'ha avaluat només mitjançant la metodologia punt a punt, i el càlcul de l'ME i RMSE (també MVWE pel vent) s'ha efectuat respecte dels perfils verticals observats d'aquestes variables procedents de 3 estacions de radiosondatge: Barcelona, Palma i Saragossa.

**Taula 4.** Conjunt de les 6 configuracions possibles resultants de la combinació dels esquemes variables: convecció i microfísica de núvols.

| | Convecció | | |
|---|---|---|---|
| Microfísica | Kain-Fritsch (KF) | Betts-Miller-Janjic (BMJ) | Grell-Devenyi (GD) |
| WRF Single Moment 5-class (WSM5) | KF·WSM5 | BMJ·WSM5 | GD·WSM5 |
| Thompson (Thom) | KF·Thom | BMJ·Thom | GD·Thom |

**Taula 5.** ME (RMSE) de la temperatura, humitat relativa, pressió a nivell del mar i altura geopotencial, i MVWE per al vent dels pronòstics a 24 hores inicialitzats a les 00 Z, corresponents a la verificació malla a malla sobre el domini de 36 km de pas de malla. Els millors resultats s'indiquen en negreta.

| | NIV (hPa) | KF·WSM5 | KF·Thom | BMJ·WSM5 | BMJ·Thom | GD·WSM5 | GD·Thom |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 850 | **-0.18** (**1.27**) | -0.24 (1.30) | -0.32 (1.31) | -0.28 (1.31) | -0.30 (1.33) | -0.28 (1.34) |
| T | 700 | -0.09 (**0.97**) | **-0.08** (**0.97**) | -0.20 (0.99) | -0.17 (0.98) | -0.12 (0.98) | -0.09 (0.98) |
| (°C) | 500 | -0.03 (0.92) | -0.03 (**0.91**) | +0.02 (0.93) | **+0.01** (0.92) | **-0.01** (0.93) | **-0.01** (0.92) |
| | 300 | **+0.21** (**0.96**) | +0.31 (0.99) | +0.27 (0.97) | +0.37 (1.01) | +0.24 (0.97) | +0.35 (1.00) |
| | 850 | **+0.1** (13.5) | +1.2 (13.6) | **-0.1** (**13.1**) | -0.2 (13.2) | +0.2 (14.5) | +0.4 (14.5) |
| HR | 700 | -1.1 (16.6) | -0.7 (16.5) | -0.3 (**16.4**) | **-0.2** (16.5) | -1.5 (17.1) | -1.4 (17.2) |
| (%) | 500 | **-0.4** (**19.9**) | **+0.4** (20.0) | +1.6 (20.6) | +2.3 (20.8) | -1.2 (20.1) | -0.7 (20.2) |
| | 300 | -8.3 (23.7) | -6.2 (22.6) | -8.2 (23.7) | -6.1 (**22.5**) | -8.2 (23.6) | **-6.0** (**22.5**) |
| P (hPa) | Niv. mar | -0.3 (1.5) | -0.4 (1.5) | -0.3 (1.5) | -0.4 (1.5) | **-0.2** (1.5) | -0.3 (1.5) |
| | 850 | -4.4 (11.7) | -4.5 (11.7) | **-3.8** (11.6) | **-3.8** (**11.2**) | -4.4 (11.8) | -4.6 (11.9) |
| Z | 700 | **-5.3** (**12.1**) | -5.5 (12.3) | -5.9 (12.6) | -5.5 (**12.1**) | -5.6 (12.5) | -5.7 (12.5) |
| (m) | 500 | **-5.6** (14.3) | -5.7 (14.4) | -6.3 (14.6) | -5.9 (**13.9**) | -5.9 (14.5) | -6.0 (14.5) |
| | 300 | -4.2 (17.8) | -3.4 (17.7) | -3.8 (17.8) | **-2.5** (**16.9**) | -4.1 (17.9) | -3.3 (17.8) |
| | 850 | **4.01** | 4.02 | 4.09 | 4.09 | 4.04 | 4.04 |
| Vent | 700 | **3.82** | 3.84 | 3.87 | 3.87 | 3.86 | 3.87 |
| (m s$^{-1}$) | 500 | 4.11 | 4.11 | 4.13 | 4.12 | 4.11 | **4.10** |
| | 300 | 5.61 | 5.62 | 5.60 | 5.61 | **5.58** | 5.59 |

Finalment, també s'ha verificat el pronòstic quantitatiu de la precipitació, la variable que més interessa en aquest treball, emprant diversos índexs estadístics obtinguts a partir de la comparació del camp pronosticat amb el camp observat. Per a dur a terme aquesta verificació ha calgut, en primer lloc, construir una anàlisi de la precipitació observada sobre una malla de 32 $\times$ 24 punts sobre Catalunya, a la qual també s'ha interpolat el camp pronosticat. A continuació, s'ha aplicat una màscara a ambdós camps per tal de comparar, únicament, l'àrea corresponent a Catalunya, ja que el camp analitzat s'ha obtingut a partir de les observacions pluviomètriques procedents de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) de l'SMC (Figura 2).

Amb els camps resultants d'aplicar la màscara, s'han avaluat els pronòstics quantitatius de precipitació des de dues perspectives complementàries: d'una banda, l'aproximació clàssica, basada en la comparació punt a punt dels camps pronosticat i observat i el càlcul de diversos índexs estadístics a partir de taules de contingència, com ara la probabilitat de detecció (POD), la proporció de falsa alarma (FAR), el biaix (BIAS) o el *Critical Success Index* (CSI), tots ells definits, per exemple, a Ebert (2008); i d'altra banda, l'aproximació basada en la verificació parcial (més coneguda com a *fuzzy*) que recompensa la proximitat entre pronòstics i observacions tot relaxant el requeriment de coincidència exacta (Ebert, 2008). En altres paraules, la verificació parcial o *fuzzy* assumeix que un pronòstic pot ser igualment útil si es troba lleugerament desplaçat respecte de l'observació i aquest desplaçament ve determinat per la mida del veïnatge o finestra de punts de la malla al voltant del punt d'interès.

Ebert (2008) recopila tota una sèrie de tècniques de verificació que s'emmarquen en aquest darrer enfocament, i les classifica en funció de l'estratègia de correspondència (segons si es considera veïnatge només al voltant del pronòstic o també al voltant de l'observació) i del model de decisió, que és el criteri que es fixa per a determinar si hi ha acord entre pronòstic i observació. Concretament, en aquest treball s'ha optat per aplicar dues tècniques de verificació parcial que s'emmarquen en el segon grup de les estratègies d'acord, de manera que es considera una àrea al voltant del punt d'observació per donar compte de la incertesa associada al camp observat; són les següents:

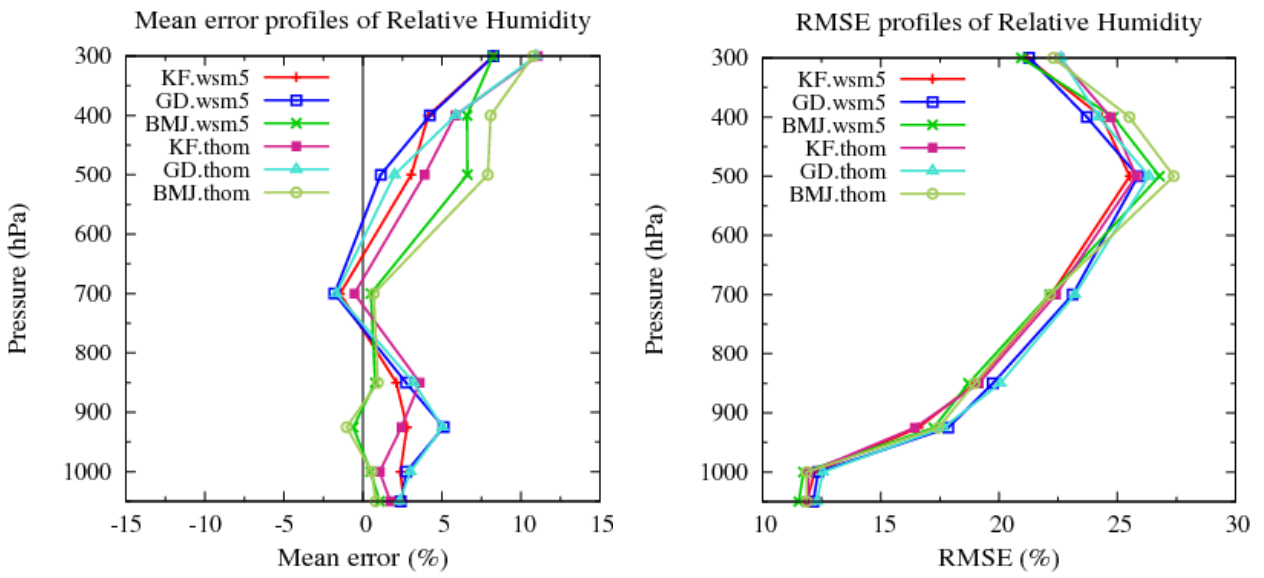


**Figura 3.** Perfils verticals, per a la verificació punt a punt de (a) (esquerra) ME i (b) (dreta) RMSE de la humitat relativa calculats sobre totes les estacions de radiosondatge compreses dins el domini de 36 km.

- Mínima cobertura: Assumeix que un pronòstic és útil si l'esdeveniment és pronosticat en un nombre mínim de punts dins de la finestra. En el present treball es pren el requeriment més permissiu, ja que es considera encert si, en almenys un punt dins de la finestra, es pronostica i s'observa l'esdeveniment. Seguint aquest criteri, es poden construir taules de contingència a partir de les correspondències entre finestres i calcular els índexs de verificació utilitzats en l'aproximació clàssica (POD, FAR, BIAS, CSI). Aquesta tècnica, doncs, permet l'ús d'aquests índexs sota el concepte de verificació parcial, i en el cas particular de finestres constituïdes per una sola cel·la, es recuperen els valors de l'aproximació clàssica.
- *Fractions Skill Score* (FSS): Desenvolupat per Roberts i Lean (2008), estableix que un pronòstic és útil si la freqüència dels esdeveniments pronosticats i la dels observats són semblants. L'índex estadístic es calcula segons:

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i - O_i)^2}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}F_i^2 + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}O_i^2} \quad (3)$$

on $F_i$ i $O_i$ són la fracció d'esdeveniments pronosticats i observats, respectivament, en cadascuna de les $N$ finestres $i$ d'una mida determinada. En aquest sentit, es considera que un esdeveniment té lloc si la precipitació supera un cert llindar d'intensitat.

L'FSS té un rang entre 0 i 1 (nul·la i màxima habilitat, respectivament), i per a mostres prou grans, tendeix a créixer a mesura que s'augmenta l'escala de verificació, determinada per la mida de la finestra de veïnatge. Roberts i Lean (2008), a més, també proposen un valor llindar ($FSS_{uniform}$) per aquest índex a partir del qual es pot considerar que el model té un encert acceptable, fet que permet determinar, si es calcula FSS per a diferents escales, a partir de quina el pronòstic és suficientment hàbil. $FSS_{uniform}$ ve determinat per l'índex FSS que s'obtindria amb finestres d'una sola cel·la per a un pronòstic en què la fracció en cadascuna de les cel·les fos igual a la fracció de cel·les del domini on s'observa pluja ($f_o$), de manera que:

$$FSS_{uniform} = 0.5 + \frac{f_o}{2} \quad (4)$$

on:

$$f_o = \frac{1}{N_1}\sum_{i=1}^{N_1} O_i \quad (5)$$

i $N_1$ és el nombre total de cel·les del domini.

La verificació de la precipitació s'ha efectuat per a diversos horitzons de pronòstic (fins a 48 hores) i llindars d'intensitat (entre 0.5 mm 6h$^{-1}$ i 50 mm 1h$^{-1}$).

## 5 Resultats

### 5.1 Domini extern ($\Delta x$ = 36 km)

En aquesta secció se sintetitzen els resultats de la verificació dels pronòstics de temperatura, humitat relativa, altura geopotencial i vent, obtinguts a partir dels dos mètodes de comparació descrits anteriorment: malla a malla i punt a punt. A tall d'exemple, a la Taula 5 es mostren els principals índexs estadístics per a avaluar el pronòstic a 24 hores (inicialitzat a les 00 Z) d'aquestes variables a diferents nivells verticals, obtinguts a partir de la verificació malla a malla.

Algunes de les característiques detectades en l'anàlisi dels resultats de la verificació a 36 km són comunes a totes les variables, com ara:

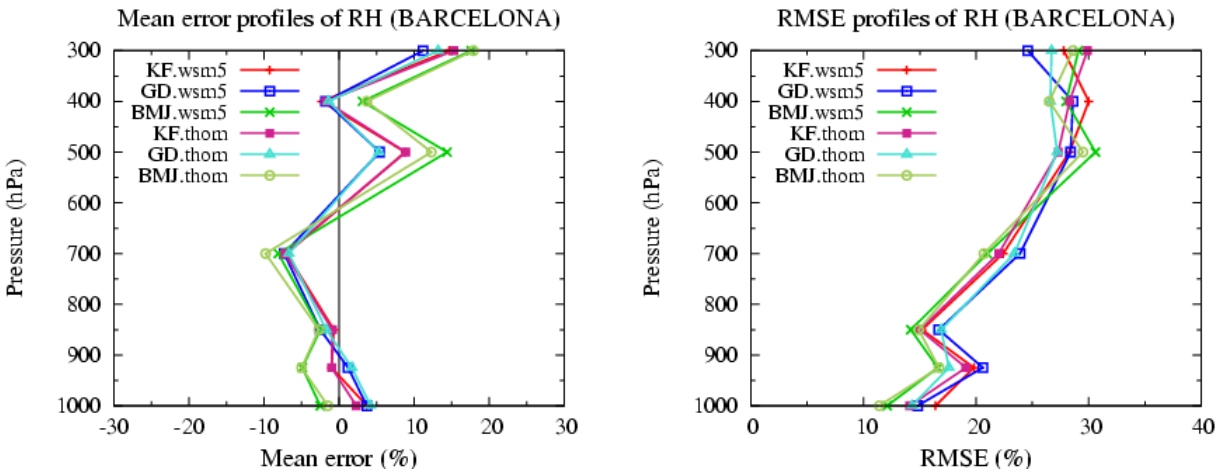


**Figura 4.** Perfils verticals de (a) (esquerra) ME i (b) (dreta) RMSE per a la humitat relativa (HR) a Barcelona, corresponents als pronòstics a 24 hores inicialitzats a les 00 Z.

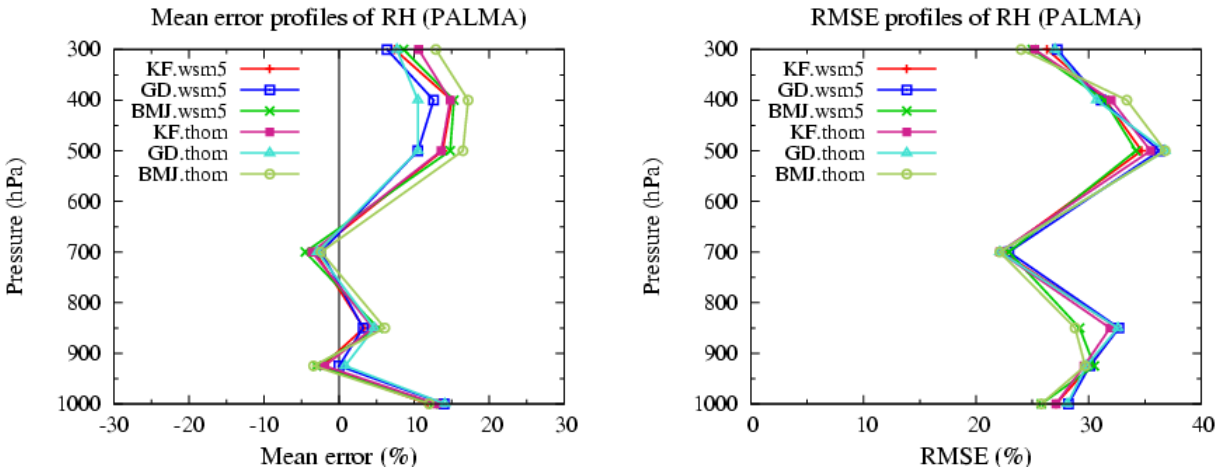


**Figura 5.** Com a la Figura 4, per a Palma.

- Més sensibilitat a la parametrització de la convecció als nivells baixos; als nivells alts resulta més difícil distingir la configuració que proporciona resultats més satisfactoris.
- A 300 hPa, els pronòstics semblen més sensibles a l'esquema de microfísica de núvols que a la parametrització de la convecció.

Més específicament, el pronòstic de la temperatura es caracteritza per tenir un RMSE que augmenta amb l'horitzó de pronòstic i, tal com es pot veure a la Taula 5, disminueix amb l'altura, tot i que aquest darrer comportament presenta una excepció entre els nivells més elevats (500 i 300 hPa). També s'aprecia un biaix de signe negatiu als nivells més propers a la superfície i de signe positiu a 300 hPa. Tenint en compte aquests índexs, els millors resultats en el pronòstic de la temperatura s'obtenen amb les configuracions que utilitzen la parametrització de la convecció de Kain-Fritsch.

Per altra banda, tal com s'aprecia a la Taula 5, en qualsevol configuració, l'altura geopotencial és subestimada en tot el perfil vertical, i també és subestimada la pressió atmosfèrica reduïda a nivell del mar. A partir dels índexs RMSE i ME resulta difícil esbrinar quina és la millor configuració, però si el pronòstic d'aquesta variable és avaluat amb l'índex S1 (Wilks, 1995), els millors resultats (valors no mostrats) els proporciona la configuració KF·WSM5.

Pel que fa al vent, s'observa com aquesta és una de les variables menys sensibles a la parametrització de la convecció, i de fet, l'índex MVWE dóna resultats molt similars en totes les configuracions (veure Taula 5).

Els pronòstics de la humitat relativa es mostren com els més sensibles als esquemes convectius, característica que també han detectat, per exemple, Koo i Hong (2008) en la seva avaluació del WRF. Aquesta variable presenta un biaix de valor més petit als nivells baixos, on totes les configuracions tendeixen a ser més humides (veure Taula 5 i Figura 3).

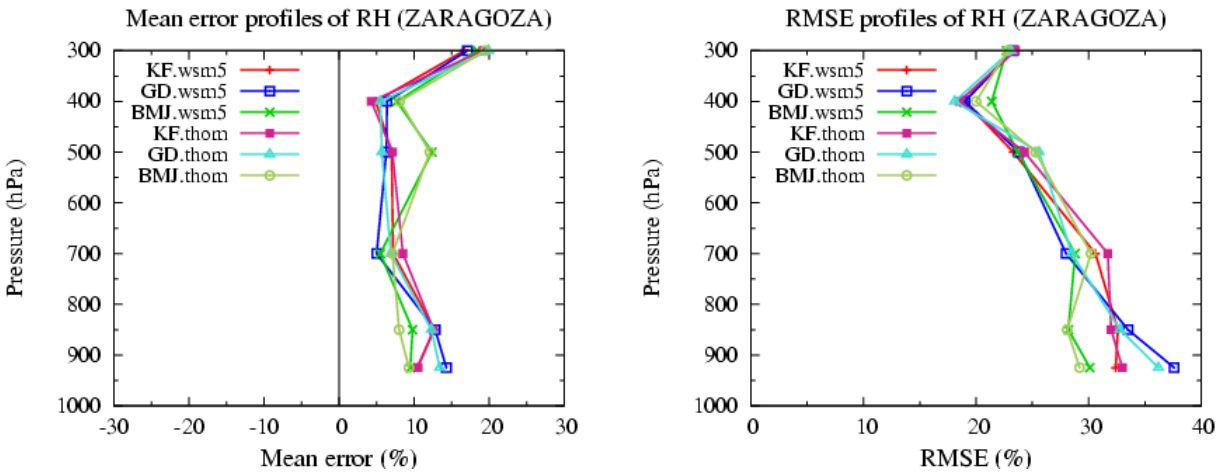


**Figura 6.** Com a la Figura 4, per a Saragossa.

**Taula 6.** Valors de CSI, POD i FAR calculats per als llindars d'intensitat de 3 mm 6h$^{-1}$ (valors superiors) i 10 mm 6h$^{-1}$ (valors inferiors) corresponents a les simulacions de les 00 Z a un horitzó de pronòstic de 18 hores. Els valors més elevats de CSI i POD i els menors de FAR són destacats en negreta.

| | KF·WSM5 | KF·Thom | BMJ·WSM5 | BMJ·Thom | GD·WSM5 | GD·Thom |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CSI | 0.43 | 0.43 | 0.44 | **0.46** | 0.39 | 0.40 |
| | **0.10** | **0.10** | 0.05 | 0.04 | **0.10** | **0.10** |
| POD | **0.67** | **0.67** | 0.66 | **0.67** | 0.62 | 0.62 |
| | 0.23 | 0.25 | 0.07 | 0.06 | 0.25 | **0.26** |
| FAR | 0.46 | 0.46 | 0.43 | **0.41** | 0.49 | 0.47 |
| | 0.86 | **0.85** | 0.89 | 0.91 | 0.86 | 0.86 |

També s'aprecia com les configuracions amb l'esquema convectiu de BMJ són les més seques als nivells baixos i les més humides en nivells elevats. L'RMSE, per la seva banda, augmenta amb l'altitud (veure Taula 5 i Figura 3) però les diferències entre les configuracions són massa petites com per decidir quina d'elles té el millor encert.

Finalment, amb els resultats obtinguts, es pot arribar a la conclusió que les dues configuracions amb l'esquema convectiu de Kain-Fritsch proporcionen els millors pronòstics de temperatura, altura geopotencial i vent, i d'entre elles dues, la que utilitza la parametrització de la microfísica de WSM5 presenta un lleuger avantatge respecte de l'altra.

## 5.2 Domini intern ($\Delta x$ = 12 km)

En primer lloc, es mostren els resultats de la verificació de les variables convencionals respecte dels perfils observats mitjançant radiosondatges i, a continuació, s'analitzen els índexs estadístics de verificació dels pronòstics quantitatius de precipitació.

### 5.2.1 Variables convencionals

Generalment, els valors de ME i RMSE per a les temperatures són baixos; la variable tendeix a ser sobreestimada als nivells alts, mentre que el seu comportament als nivells baixos depèn de l'estació de radiosondatge amb què es compari. De totes maneres, s'observa que les configuracions que inclouen els esquemes convectius de GD i KF tenen un comportament més regular que la resta (no es mostra).

Per al vent, l'MVWE en els nivells baixos i alts és més elevat que en els nivells mitjans, i les configuracions que utilitzen les parametritzacions de KF i BMJ tenen major encert. Per la seva banda, la verificació de la humitat relativa mostra que l'error mitjà (Figures 4a - 6a) és baix (-10, 15%) en les tres localitzacions i per a tots els nivells. De totes maneres, a Barcelona i Palma el model és més humit als nivells baixos i molt humit als més alts, mentre que a Saragossa tot el perfil vertical és massa humit. Pel que fa a l'RMSE, (Figures 4b - 6b) el seu valor s'incrementa amb l'altura als nivells més baixos, mentre que tendeix a disminuir entre els 500 i 300 hPa a Barcelona i Palma.

Finalment, es pot concloure que gairebé totes les configuracions donen resultats similars en la seva verificació.

### 5.2.2 Verificació del pronòstic quantitatiu de la precipitació

A causa del gran nombre de dades a analitzar, aquesta verificació s'ha fet en dos passos. En una primera fase,

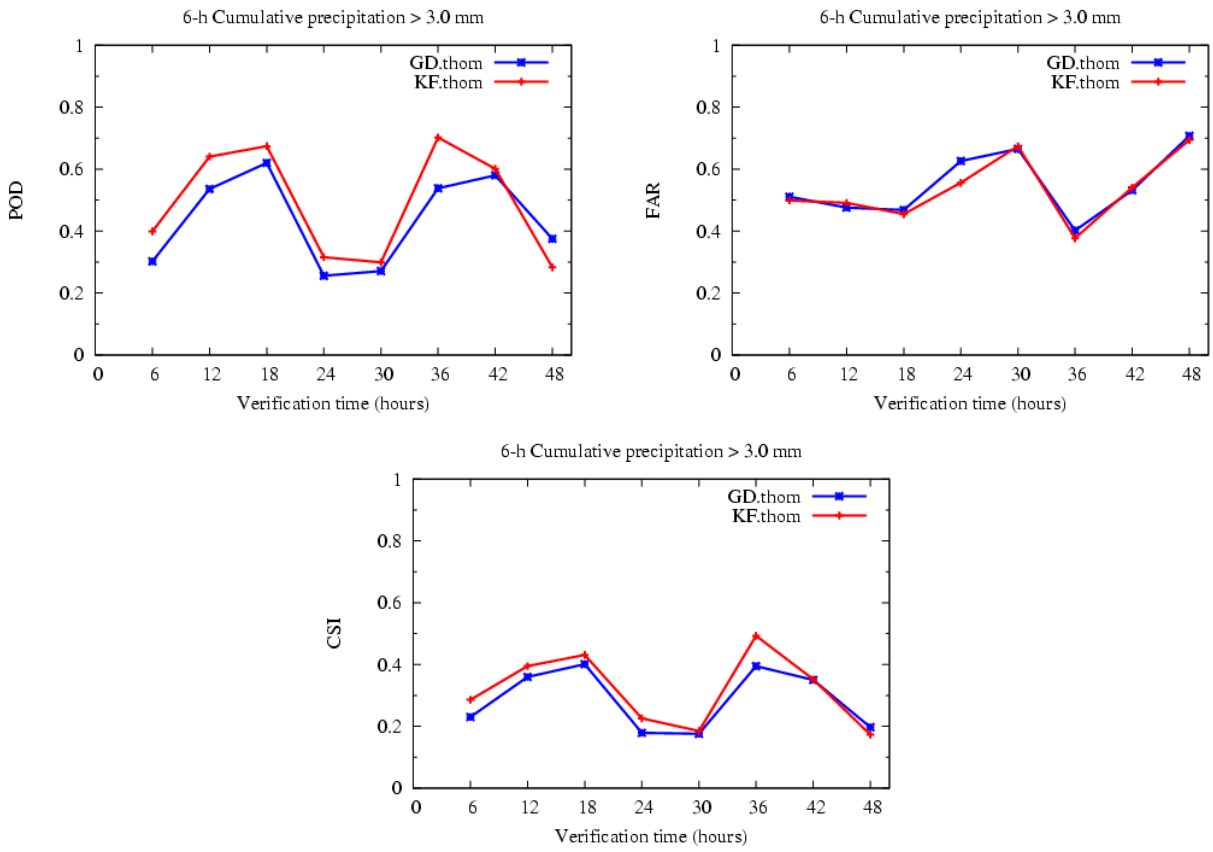


**Figura 7.** Evolució temporal dels índexs (a) (esquerra) POD, (b) (dreta) FAR i (c) CSI, calculats des de l'aproximació clàssica (punt a punt) sobre totes les simulacions inicialitzades a les 00 Z per a les configuracions seleccionades, corresponents a intensitats superiors a 3 mm $6h^{-1}$.

s'han analitzat els índexs estadístics tradicionals per als intervals horaris d'acumulació més significatius (3 i 6 hores) amb l'objectiu de seleccionar, d'entre les 6 combinacions disponibles, un subconjunt amb les configuracions que proporcionen els resultats més satisfactoris.

En la segona fase, les configuracions seleccionades s'han avaluat amb més profunditat: d'una banda, s'han aplicat les dues tècniques de verificació parcial o *fuzzy* descrites a l'apartat 4.2, a més de les clàssiques, per a diversos llindars d'acumulacions al llarg d'1, 3 i 6 hores i, d'altra banda, s'ha realitzat una comparació visual dels camps pronosticat i observat. D'aquesta manera s'ha decidit quina configuració proporciona els pronòstics òptims.

En la primera selecció, s'han descartat les configuracions que utilitzen l'esquema convectiu de BMJ, ja que mostren poc encert a l'hora de pronosticar intensitats elevades, tal com es pot apreciar a la Taula 6. Malgrat tot, cal destacar que aquestes configuracions funcionen bé quan es produeixen precipitacions de poca intensitat. De fet, aquest comportament també ha estat detectat en altres treballs de verificació dels pronòstics de precipitació del WRF. Per exemple, Gallus i Bresch (2006) detectaren que la parametrització de BMJ acostuma a donar un BIAS elevat per a llindars d'intensitat baixos i un BIAS petit per als llindars més elevats, i segons Jankov et al. (2007), l'esquema de BMJ té tendència, per una banda, a generar extenses àrees de precipitació dèbil, donant lloc a aquests valors de BIAS alts que poden associar-se a puntuacions elevades d'alguns índexs d'encert, i per altra banda, també acostuma a subestimar les acumulacions de precipitació més elevades.

D'entre les altres quatre combinacions (amb les parametritzacions convectives de KF i GD), resulta difícil discernir quina funciona millor, però només se seleccionen aquelles que es combinen amb la microfísica de Thompson perquè els seus resultats en la verificació de la precipitació, tot i similars, són lleugerament millors que els proporcionats per les combinacions amb WSM5. En aquest punt, la tria de les dues configuracions que s'analitzen amb més profunditat ja implica una discrepància entre les parametritzacions de la microfísica escollides per al domini extern i l'intern, que no es pot interpretar com una demostració que diferents configuracions donin resultats millors en funció del domini en què s'apliquin, ja que per poder fer aquesta afirmació seria necessari aplicar estratègies de verificació paral·leles en ambdós dominis i considerar també el camp de precipitació a 36 km. En aquest sentit, el principal objectiu per al domini intern era tenir uns pronòstics òptims de precipitació, men-

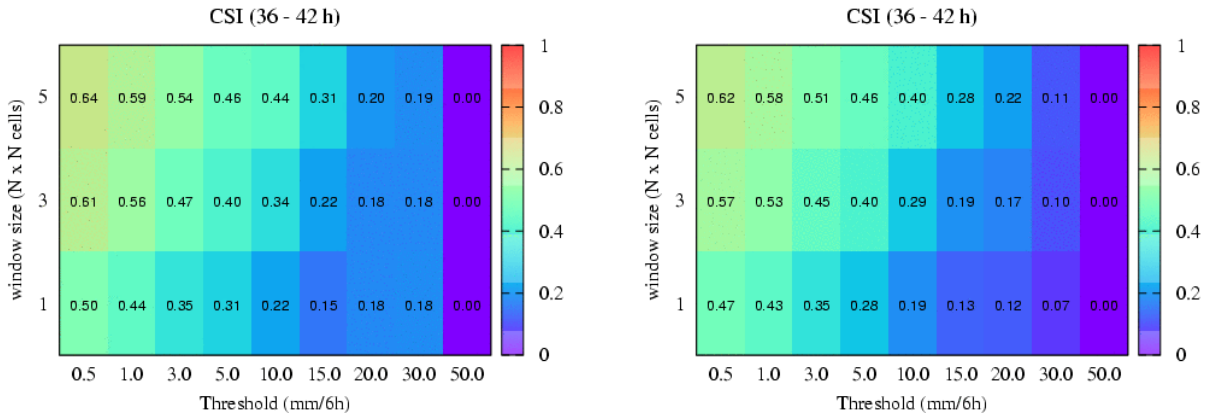


**Figura 8.** Índex CSI, calculat a partir del mètode de mínima cobertura, sobre totes les simulacions inicialitzades a les 00 Z en funció del llindar d'intensitat i de la finestra de veïnatge, per al període de 36-42 Z d'horitzó de pronòstic, corresponent a la tarda del segon dia de pronòstic, per a la configuració de KF·Thom (a) (esquerra) i per a la de GD·Thom (b) (dreta).

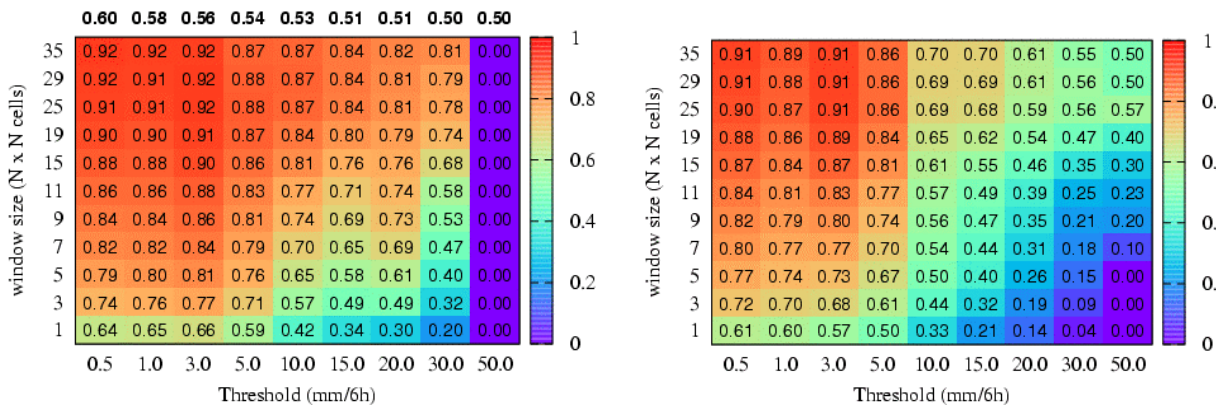


**Figura 9.** Índex FSS sobre totes les simulacions inicialitzades a les 00 Z en funció del llindar d'intensitat i de la finestra de veïnatge, per al període de 30-36 Z d'horitzó de pronòstic, corresponent al matí del segon dia de pronòstic, per a la configuració de KF·Thom (a) (esquerra) i per a la de GD·Thom (b) (dreta). Els valors en negreta situats damunt del gràfic (a) corresponen a $FSS_{uniform}$.

tre que al domini extern, que proporciona les condicions de contorn a l'intern, el màxim interès era que les variables convencionals fossin correctament pronosticades.

Després de la primera selecció, les configuracions KF·Thom i GD·Thom es poden analitzar amb més detall. Si s'observa l'evolució temporal dels índexs CSI i POD, calculats sota l'aproximació clàssica, es detecten dos valors màxims sobre les 18 i 36 hores d'horitzó de pronòstic (veure Figura 7) en les simulacions que s'inicialitzen a les 00 Z, de manera que corresponen als intervals compresos entre les 12 Z i 18 Z del primer dia i entre les 06 Z i 12 Z del segon dia, ambdós al llarg d'hores diürnes, durant les quals l'activitat convectiva és més important. Aquests dos intervals de màxim encert, separats entre ells en el temps, suggereixen una influència dels sistemes atmosfèrics de més gran escala, mitjançant el pronòstic utilitzat per alimentar les condicions de contorn, sobre l'activitat convectiva simulada pel model entre les 30 i 36 hores d'horitzó de pronòstic.

Per altra banda, la comparació d'aquestes dues configuracions mostra que KF·Thom té millor encert que GD·Thom per a quasi tots els horitzons de pronòstic (Figura 7) ja que l'índex POD més elevat es correspon amb un índex FAR idèntic o inferior, circumstància que dóna lloc a un CSI més alt. De totes maneres, ambdues configuracions mostren que en els períodes en què els índexs POD i CSI augmenten, l'índex FAR disminueix, fet que manifesta el bon funcionament, en general, dels pronòstics de la precipitació.

Si aquests índexs són calculats des de l'aproximació de verificació parcial amb el model d'acord de mínima cobertura, s'observa clarament com el comportament relatiu entre les dues configuracions es manté per a la majoria de llindars encara que es relaxi la coincidència espacial entre pronòstics i observacions ampliant la finestra de verificació a quadrats de 3 i 5 cel·les de costat. A la Figura 8, per posar-ne un exemple, es mostra l'índex CSI corresponent als pronòstics de precipitació acumulada en 6 hores per al període d'entre 36 i 42

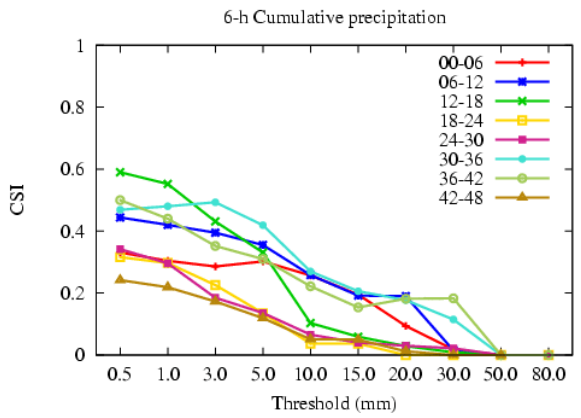


**Figura 10.** Per a la configuració de KF + Thompson, índex CSI, calculat des de l'aproximació clàssica, sobre totes les simulacions inicialitzades a les 00 Z, per a cada interval de pronòstic de 6 hores de llargada, en funció del llindar d'acumulació.

hores d'horitzó de pronòstic, i s'observa, com és d'esperar, que el seu valor augmenta a mesura que es relaxa el criteri de correspondència. Malgrat això, els valors de la configuració KF·Thom segueixen sent superiors en la majoria d'escales i llindars.

L'avaluació contrastada dels pronòstics de precipitació donats per les dues configuracions es pot completar analitzant els valors donats per l'índex FSS, que també forma part de les tècniques de verificació parcial o *fuzzy* definides anteriorment. Aquest estadístic permet determinar l'escala a partir de la qual un pronòstic té un encert acceptable, fet que es compleix quan FSS supera el valor de $FSS_{uniform}$ (Equació 4). A partir dels valors d'aquest índex es detecta com la configuració de KF·Thom tendeix a superar l'$FSS_{uniform}$ per a escales més petites que GD·Thom i, en la majoria de casos, per a les mateixes escales dóna valors de FSS més elevats. En les escales més grans, els valors de FSS de KF·Thom s'acosten més a la unitat, fet que indica un biaix de magnitud més petita. A la Figura 9 es mostra un exemple dels valors l'índex FSS de les dues configuracions per a l'interval de 6 hores corresponent al matí del segon dia de pronòstic, i es poden observar les característiques que s'acaben de comentar quant al comportament relatiu dels dos models, amb l'excepció del llindar d'intensitat més elevada (50 mm 6h$^{-1}$), per al qual GD·Thom fa un pronòstic clarament millor.

Quant a la verificació visual del camp de precipitació (no es mostra), s'ha detectat una certa homogeneïtat entre les dues configuracions en el pronòstic de precipitacions al quadrant NW de Catalunya (que inclou un dels màxims pluviomètrics del territori), i també en el conjunt del domini en els casos en què la precipitació explícita representa una part important de la precipitació total pronosticada; aquestes darreres situacions majoritàriament s'associen al pas de sistemes frontals sobre l'àrea d'estudi. En canvi, quan la precipitació simulada és majoritàriament d'origen convectiu, les configuracions difereixen substancialment en zones del quadrant NE i al litoral i prelitoral central, amb discrepàncies en els patrons de precipitació que s'accentuen a mesura que l'horitzó de pronòstic s'allarga.

En definitiva, es pot concloure que les dues configuracions seleccionades presenten un encert satisfactori, però els tres mètodes de verificació emprats per a comparar-los reiteren que és la combinació de la parametrització convectiva de Kain-Fritsch amb l'esquema microfísic de Thompson la que mostra el comportament més consistent i els pronòstics més acurats.

Arribats a aquest punt, resulta interessant caracteritzar el comportament particular d'aquesta configuració representant l'índex CSI, calculat des de l'aproximació clàssica, en funció del llindar d'intensitat per a cada interval 6-horari, tal com es mostra a la Figura 10. S'observa com, per a precipitacions dèbils, la millor previsió l'aconsegueix entre les 12 Z i 18 Z del primer dia, per a pluges moderades (3 a 15 mm en 6 hores) entre les 06 Z i 12 Z del segon dia, i el millor pronòstic per a les pluges més intenses (30 mm 6h$^{-1}$) el dóna entre les 12 Z i 18 Z del segon dia.

## 6 Conclusions

En el present treball s'ha avaluat la sensibilitat del model WRF-ARW 2.2 a les combinacions de les diferents parametritzacions convectives disponibles al model amb els esquemes microfísics WSM5 i Thompson, per a 11 casos d'estudi repartits entre diferents èpoques de l'any. El principal propòsit ha estat buscar una configuració estable del model per als pronòstics operatius a l'SMC.

Tant per al domini extern (36 km de pas de malla) com per a l'intern (12 km), s'han verificat les variables convencionals mitjançant el càlcul dels índexs ME i RMSE, i el MVWE per al vent. Els millors resultats per al domini extern s'han obtingut amb la configuració que combina la parametrització de la convecció de Kain-Fritsch amb l'esquema microfísic WSM5. Per al domini intern no s'ha trobat cap configuració que destaqués en el pronòstic de les mateixes variables verificades al domini extern, però després d'avaluar el pronòstic quantitatiu de la precipitació amb els índexs estadístics clàssics (POD, CSI, FAR i BIAS), s'han escollit les dues configuracions amb millors resultats (les que combinen Kain-Fritsch i Grell-Devenyi amb Thompson) i s'ha realitzat una verificació més exhaustiva, en la qual s'han emprat dues tècniques de verificació parcial o *fuzzy* (mínima cobertura i *Fractions Skill Score*) per a complementar la metodologia clàssica. L'anàlisi d'aquests resultats ha mostrat que la configuració amb el millor encert és la que combina Kain-Fritsch amb la microfísica de Thompson.

Malgrat tot, cal reconèixer que la significativitat d'aquests resultats té certes limitacions. D'una banda, els casos d'estudi corresponen a un període de temps concret (anys 2006 i 2007) i la variabilitat meteorològica interanual, sobretot pel que fa a precipitacions, és extraordinàriament

elevada al territori estudiat. D'altra banda, s'ha deixat fora de l'objectiu d'aquest treball analitzar la sensibilitat dels pronòstics a les parametritzacions de la capa límit disponibles al model, tot i que juguen un paper clau en la simulació dels processos convectius.

L'aplicació pràctica més immediata d'aquest treball és la implementació de les dues configuracions escollides (KF·WSM5 per al domini extern i KF·Thom per al niat) als pronòstics operatius del WRF a l'SMC. Això permetrà, posteriorment, verificar els pronòstics del WRF contra els altres models que actualment funcionen operativament a l'SMC.

A més, s'estableix un punt de partida per a continuar treballant amb el model WRF-ARW amb l'objectiu de millorar els pronòstics operatius realitzats per l'SMC. D'una banda, en tractar-se d'un model en constant evolució, caldrà verificar els pronòstics produïts per les versions actualitzades del model, i realitzar més estudis de sensibilitat si s'incorporen noves parametritzacions, que hauran d'incloure els processos de PBL que han quedat fora d'aquest treball. D'altra banda, atès que és la parametrització convectiva present al WRF la que ha donat millor resultat sobre l'àrea d'interès, també s'obre una via per investigar amb profunditat l'esquema de Kain-Fritsch, tot realitzant estudis de sensibilitat dels pronòstics a diferents paràmetres interns de l'esquema amb l'objectiu d'introduir-hi modificacions que resultin en una millora dels pronòstics de la pluja convectiva sobre Catalunya.

**Agraïments.** Volem agrair l'ajuda i els consells dels nostres companys de l'Àrea de Recerca Aplicada i Modelització del Servei Meteorològic de Catalunya, i també l'acurada lectura del treball i les observacions aportades pels dos revisors anònims que han ajudat a millorar la qualitat de l'article.

## Referències

Barker, D. M., Huang, W., Guo, Y. R., i Xiao, Q. N., 2004: *A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results*, Mon Wea Rev, **132**, 897–914, doi: 10.1175/1520–0493(2004)132<0897:ATVDAS>2.0.CO;2.

Borge, R., Alexandrov, V., del Vas, J. J., Lumbreras, J., i Rodríguez, E., 2008: *A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula*, Atmos Environ, **42**, 8560–8574, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.032.

Davis, C. A., Brown, B., i Bullock, R., 2006: *Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems*, Mon Wea Rev, **134**, 1785–1795, doi: 10.1175/MWR3146.1.

Ebert, E. E., 2008: *Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework*, Meteorol Appl, **15**, 51–64, doi: 10.1002/met.25.

Gallus, W. A. i Bresch, J. F., 2006: *Comparison of Impacts of WRF Dynamic Core, Physics Package, and Initial Conditions on Warm Season Rainfall Forecasts*, Mon Wea Rev, **134**, 2632–2641, doi: 10.1175/MWR3198.1.

Hong, S.-Y. i Pan, H. L., 1996: *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*, Mon Wea Rev, **124**, 2322–2339, doi: 10.1175/1520–0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2.

Hong, S.-Y., Dudhia, J., i Chen, S.-H., 2004: *A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation*, Mon Wea Rev, **132**, 103–120, doi:10.1175/1520–0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2.

Hong, S.-Y., Noh, Y., i Dudhia, J., 2006: *A new vertical diffusion package with an explcit treatment of entrainment processes*, Mon Wea Rev, **134**, 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.

Jankov, I., Gallus, W. A., Segal, M., i Koch, S. E., 2007: *Influence of Initial Conditions on the WRF-ARW Model QPF Response to Physical Parameterization Changes*, Wea Forecasting, **22**, 501–519, doi: 10.1175/WAF998.1.

Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., i Baldasano, J. M., 2008: Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorologial simulations over Europe, Papers del 9th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 23-27/VI/2008, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2008/abstracts/8-03.pdf.

Kain, J., Weiss, S., Baldwin, M., Carbin, G., Bright, D., Levit, J., i Hart, J., 2005: Evaluating high-resolution configurations of the WRF model that are used to forecast severe convective weather: The 2005 SPC/NSSL spring experiment, Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Washington, D.C., Amer. Meteor. Soc., 2A.5, http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/94843.pdf.

Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., i Bright, D. R., 2006: *Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004*, Wea Forecasting, **21**, 167–181, doi: 10.1175/WAF906.1.

Klemp, J. B., 2006: *Advances in the WRF model for convection-resolving forecasting*, Advances in Geosciences, **7**, 25–29.

Koo, M. S. i Hong, S. Y., 2008: Diurnal cycle of the simulated precipitation in WRF: physics sensitivity, Papers del 9th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 23-27/VI/2008, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2008/abstracts/P9-13.pdf.

Llasat, M. C., 2001: *An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the northeast of Spain*, Int J Climatol, **21**, 1385–1400, doi: 10.1002/joc.692.

Llasat, M. C. i Puigcerver, M., 1997: *Total rainfall and convective rainfall in Catalonia, Spain*, Int J Climatol, **17**, 1683–1695, doi:10.1002/(SICI)1097–0088(199 712)17:15<1683::AID–JOC220>3.0.CO;2–Q.

Mateo, J., Ballart, D., Brucet, C., Aran, M., i Bech, J., 2009: *A study of a heavy rainfall event and a tornado outbreak during the passage of a squall line over Catalonia*, Atmos Res, **93**, 131–146, doi:10.1016/j.atmosres.2008.09.030.

Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A., i Cunillera, J., 2007: Sensitivity of precipitation forecasts to cumulus parameterizations in Catalonia (NE Spain), Papers del 8th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 11-15/VI/2007, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/p1-26_Mercader.pdf.

Otkin, J., Huang, H. L., i Seifert, A., 2006: A comparison of microphysical schemes in the WRF model during a severe weather event, Papers del 7th WRF Users' Workshop, Boulder, CO, USA, 19-22/VI/2006, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2006/abstracts/PSession05/P5_7_Otkin.pdf.

Roberts, N. M. i Lean, H. W., 2008: *Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Fore-*

*casts of Convective Events*, Mon Wea Rev, **136**, 78–97, doi: 10.1175/2007MWR2123.1.

Sairouni, A., Moré, J., Toda, J., Miró, J. R., Aran, M., i Cunillera, J., 2007: Verificació dels models de mesoescala operatius al Servei Meteorològic de Catalunya, Notes d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, n. 71, 78 pp. (ISBN 978-84-393-7590-6).

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., i Powers, J. G., 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech Notes-468+STR, (rev. 2007).

Thompson, G., Rasmussen, R. M., i Manning, K., 2004: *Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis*, Mon Wea Rev, **132**, 519–542, doi: 10.1175/1520–0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2.

Wang, W., Barker, D., Bray, J., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., i Michalakes, J., 2007: User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 2.2, Mesoscale and Microscale Meteorology Division - National Center for Atmospheric Research (MMM-NCAR).

Weisman, M. L., Davis, C., Wang, W., Manning, K. W., i Klemp, J. B., 2008: *Experiences with 0-36-h Explicit Convective Forecasts with the WRF-ARW Model*, Wea Forecasting, **23**, 407–437, doi: 10.1175/2007WAF2007 005.1.

Wilks, D. S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction, Academic Press, 467 pp.

Wisse, J. S. P. i Vilà-Guerau de Arellano, J., 2004: *Analysis of the role of the planetary boundary layer schemes during a severe convective storm*, Ann Geophys, **22**, 1861–1874, doi:10.5194/angeo–22–1861–2004.