

## Simulació numèrica mesoscalar de l'ozó troposfèric a Catalunya

Sara Ortega Jiménez

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

## 5. MODEL METEOROLÒGIC

### 5.1. Descripció

Un model meteorològic és una descripció matemàtica de l'evolució en el temps que experimenten les variables que defineixen l'estat de l'atmosfera, de manera que a partir d'un estat inicial de l'atmosfera i unes condicions de contorn és capaç de preveure en quin estat es trobarà en un temps posterior, o el que és el mateix preveure els valors de les variables meteorològiques en el temps i en l'espai. Les variables que descriuen l'estat de l'atmosfera, pressió, densitat, temperatura i velocitat, se'ls hi suposa un estat únic en el continu atmosfèric. També es suposa que les seves derivades són funcions contínues en l'espai i en el temps. Llavors, es poden expressar les lleis fonamentals de conservació de massa, moment i energia en funció de les variables que descriuen l'estat de l'atmosfera i de les seves derivades.

Per tant, el moviment atmosfèric es regeix per les lleis de conservació de la massa, del moment lineal i de l'energia. A partir d'aquestes lleis s'obtenen les equacions que permetran determinar l'evolució en el temps de les variables atmosfèriques mitjançant un model numèric de predicció del temps. El model Penn State University/National Center Atmospheric Research Mesoscale Model (MM5 meteorological model) (Grell et al., 1994) i que ens hi referirem com MM5 d'ara en endavant, és un model dinàmic, o de pronòstic, que utilitza les equacions dinàmiques que consideren l'atmosfera com un fluid compressible i no hidrostàtic.

A continuació s'escriuran les equacions per les variables en el model no hidrostàtic, en termes de les coordenades ( $x$ ,  $y$ ,  $\sigma$ ), coordenades que segueixen el terreny. La coordenada  $\sigma$  és una quantitat adimensional que descriu els nivells verticals del model:

$$\sigma = (p_0 - p_t) / (p_{s0} - p_t) \quad (1)$$

en què  $p_0$  és la pressió de l'estat de referència,  $p_t$  és la pressió límit superior,  $p_{s0}$  és la pressió en superfície de l'estat de referència. A la Figura 5.1. es pot veure una representació dels nivells sigma per una configuració amb 15 nivells i el seguiment del terreny que fan. L'estat de referència correspon a un perfil idealitzat de temperatura en equilibri hidrostàtic.

L'equació per la tendència de la pressió:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \vec{V} = -\vec{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (2)$$

en què

$p'$  és la pertorbació, donat l'estat de referència  $p_0$ , l'estat pertorbat  $p = p_0 + p'$

$t$  es refereix al temps

$\rho_0$  és la densitat

$g$  és la gravetat

$w$  és la velocitat vertical del vent

$\gamma = c_p / c_v$ , coeficient adiabàtic,  $c$  capacitat calorífica a pressió ( $p$ ) o a volum ( $v$ )

$p$  és la pressió hidrostàtica

$\vec{V}$  és el vector velocitat del vent,  $\vec{V} = (u, v, w)$

$T$  és la temperatura,  $T_0$  la temperatura a l'estat de referència

$\dot{Q}$  és el flux de calor

$\theta_0$  és la temperatura potencial a l'estat de referència

En el model l'equació (2) no inclou el darrer terme entre parèntesis del costat dret, es negligeix. Aquest terme representa un increment de pressió causat per l'escalfament i que força a l'aire a expandir-se.

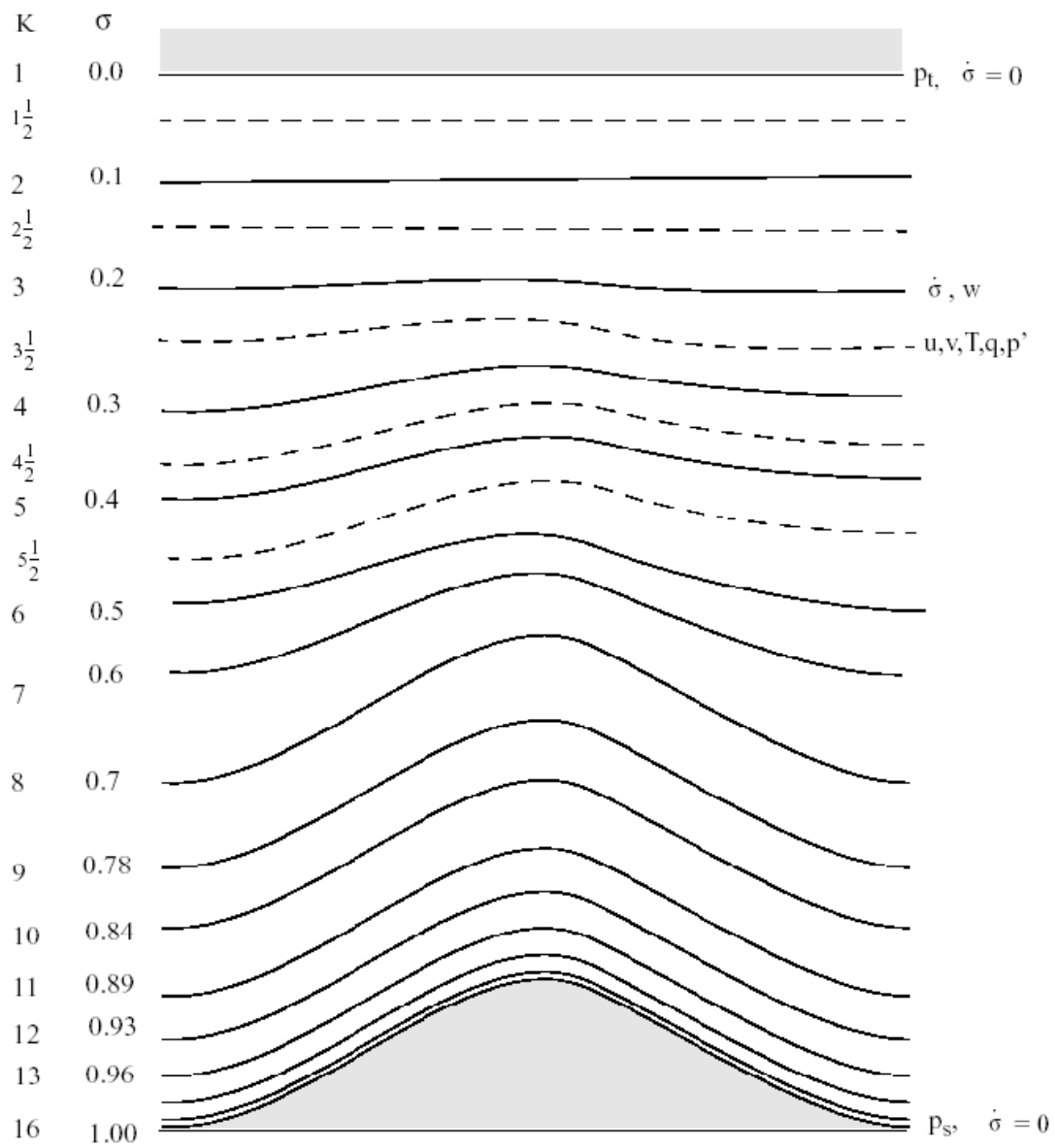


Figura 5.1. Representació esquemàtica dels nivells verticals en el model MM5. Representació dels nivells  $\sigma$  (\_\_\_), i dels nivells entre sigmes (----). (Font: MM5 tutorial: <http://mmm.ucar.edu/mm5>)

De la segona llei de Newton s'arriba a l'equació pel moment, component x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\vec{V} \cdot \nabla u + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_{terra}} + D_u \quad (3)$$

en què:

u és la component x del vent

m és el factor d'escala del mapa, m= distància en la malla/ distància real a la Terra

p\*=p<sub>s</sub>-p<sub>t</sub>, pressió en superfície i pressió en el límit superior

f = 2Ω sinλ , és el paràmetre de Coriolis

e=2Ω cosλ és l'altra component de Coriolis, Ω velocitat angular, λ latitud

α=Φ-Φ<sub>c</sub> l'angle de rotació de la xarxa

r<sub>terra</sub> és un terme de curvatura vertical

Per la component y l'equació del moment és similar, intercanviant u per v, i x per y.

I l'equació del moment per la component z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma} \frac{p'}{p} = -\vec{V} \cdot \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{gR_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{terra}} + D_w \quad (4)$$

De la primera llei de la Termodinàmica es deriva l'equació per la temperatura:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (5)$$

On el terme entre parèntesis és el terme d'escalfament diabàtic i el terme en  $\dot{Q}$  és el terme adiabàtic.

La forma de funcionament del model, amb els preprocessos que preparen les dades, segueix l'estructura de la Figura 5.2.

Les dades del terreny i les dades meteorològiques s'interpolen de latitud/longitud al domini rectangular en la projecció triada per treballar-hi mitjançant els mòduls TERRAIN i REGRID de MM5. El mòdul RAWINS/little\_r fa una correcció de les interpolacions de les dades meteorològiques amb dades d'estacions. El mòdul INTERPF fa una interpolació vertical dels nivells de pressió a les coordenades σ utilitzades per MM5. Per altra banda, si les dades ja estan en coordenades σ es pot utilitzar el mòdul 3DVAR per incorporar les dades al model. El mòdul INTERPB serveix per transformar la sortida del model de coordenades σ a pressió. I el mòdul NESTDOWN es pot utilitzar per interpolat la sortida del model a una resolució més fina per preparar el model per una nova simulació pels dominis interiors (<http://mmm.ucar.edu/mm5>).

## The MM5 Modeling System Flow Chart

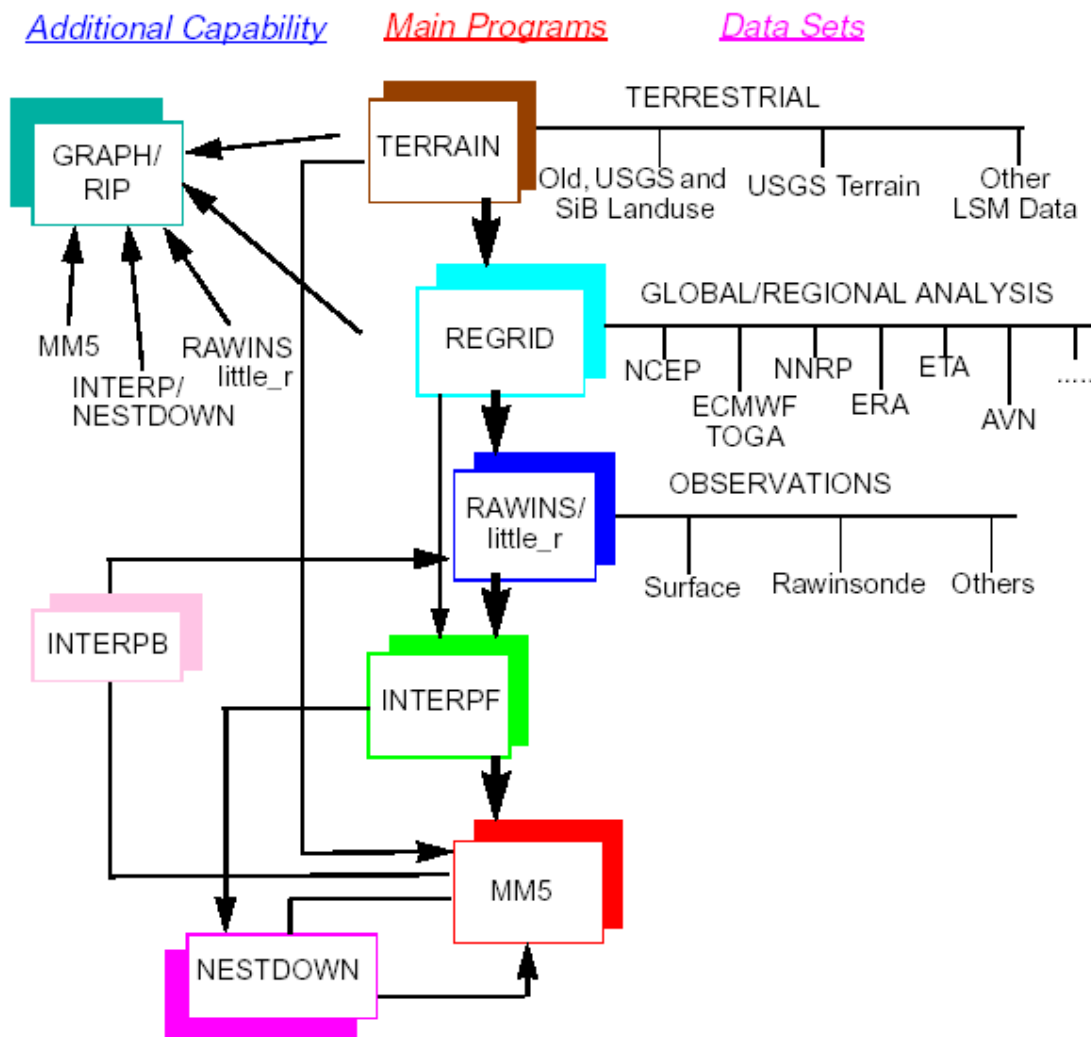


Figura 5.2. Diagrama de flux del model MM5.

### 5.2. Característiques de la simulació meteorològica

El model meteorològic no hidrostàtic MM5 (Grell et al., 1994) s'ha executat en els quatre dominis anuats mostrats a la Figura 5.3. L'aniuament assegura que, encara que s'obtingui per exemple un camp de vent en una regió concreta i relativament petita a una molt alta resolució, aquesta inclogui efectes introduïts per estructures orogràfiques que no estiguin contingudes en el domini de simulació amb més resolució però que modifiquen de manera important el règim circulatori que s'estableix. Si l'aniuament, com en el nostre cas, és en els dos sentits, la influència és mútua, els dominis grans influeixen sobre els més petits, i alhora els petits influeixen sobre els grans. El domini 1 o domini exterior inclou la meitat sud d'Europa, amb la Península Ibèrica, gran part de França, Itàlia i una petita franja del continent Africà. La resolució de cada cel·la és de  $27 \times 27 \text{ km}^2$ , i n'hi ha 68 en la direcció est-oest i 44 en la direcció nord-sud. El domini 2,  $30 \times 30$  cel·les de resolució  $9 \times 9 \text{ km}^2$ , cobreix tota Catalunya. Finalment hi ha dos dominis interiors a Catalunya, situats sobre dos zones d'interès des del punt de vista de la contaminació fotoquímica, amb resolució de  $3 \times 3 \text{ km}^2$ , s'espera que reproduïxin els

efectes més locals. La resolució vertical inclou 30 nivells, havent-hi uns 15 dins la capa límit.

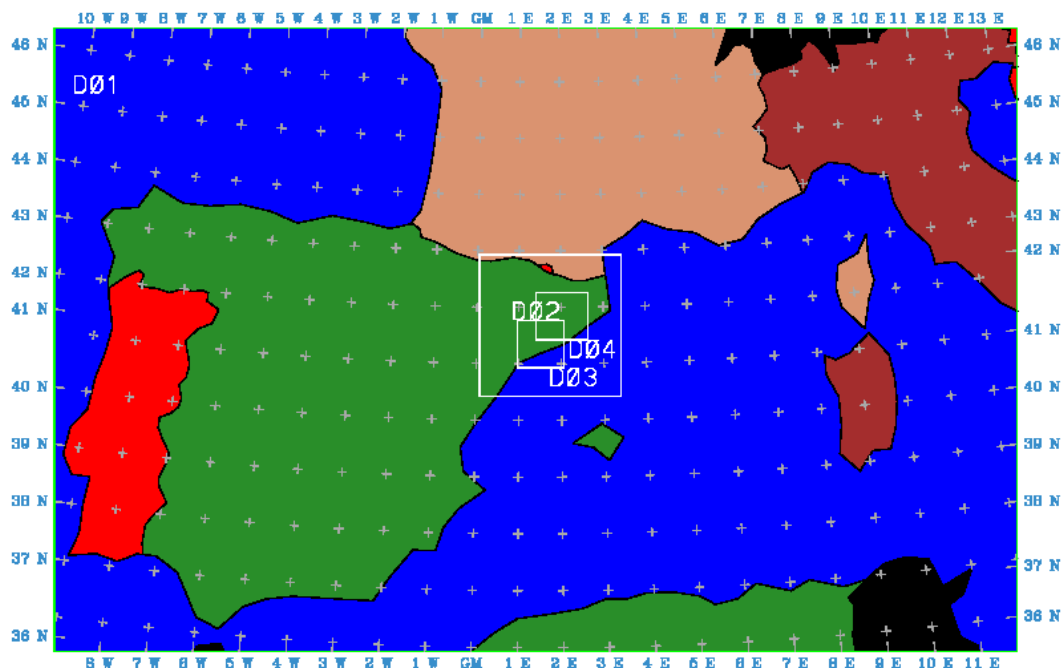


Figura 5.3 Dominis per la simulació amb el model MM5.

Les condicions inicials i de contorn per la simulació meteorològica són del ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts). La informació del terreny és de USGS amb resolució de 30'' en els dominis menors. L'esquema de capa límit que utilitza és el de Medium Range Forecast (MRF) basat en l'esquema de Troen-Mahrt, que utilitza teoria K.

### 5.3. Estudi de les situacions meteorològiques.

Es van triar quatre períodes per fer-ne les simulacions fotoquímiques, en base a les seves peculiaritats en relació a l'ozó. Tres dels períodes van correspondre a altes concentracions d'ozó mesurat i l'altre període a una situació de vents de l'oest, temperatures baixes per l'època de l'any i baixos nivells d'ozó.

S'han analitzat les situacions meteorològiques corresponents als diferents períodes corresponents a aquestes diferents situacions meteorològiques. La primera del 10 al 14 de juny de 2003 correspon a una situació de pantà baromètric amb dèbil gradient bàric. La segona, del 1 al 6 de juliol del 2003 correspon a una situació de vents de l'oest. La tercera correspon a una situació amb altes temperatures i s'estén del 1 al 10 d'agost del 2003 i està separada en dos períodes de simulació, un que va del 1 fins al 8 d'agost, un altre que va del 6 al 10 d'agost.

Se n'ha fet la validació de les simulacions meteorològiques en els dominis centrats a Catalunya, el D2, D3 i D4, amb 17 estacions coincidents en aquests dominis, per avaluar l'encert o desencert de l'actuació del model en relació a aquests dominis, que són de màxim interès ja que en volem analitzar la simulació fotoquímica.

#### 5.3.1. Simulació del 10 al 14 de juny de 2003.

S'ha realitzat una simulació per al període de cinc dies comprés entre el 10 i el 14 de juny de 2003. S'ha estudiat aquest període ja que la situació de pantà baromètric,

afavoreix la formació de la brisa de mar i per tant el transport d'ozó i precursors des de la zona costanera a l'interior (Ortega et al., 2004). D'altra banda, l'absència de nuvolositat, facilita la formació d'ozó, causant algunes superacions del llindar d'informació durant aquest període.

Les sortides numèriques del model MM5 per al període d'estudi, especialment el vent i la temperatura, són les que el model fotoquímic CMAQ posteriorment utilitzarà per la simulació de l'ozó i altres contaminants atmosfèrics. Per això, se n'ha fet la validació amb estacions de mesura.

A les Figures 5.4. i 5.7. es presenten els mapes de temperatura, línies de corrent i vent corresponents a les simulacions numèriques realitzades amb el model MM5, pel domini exterior de simulació D1 (27km de resolució). Les línies blaves són línies de corrent que ens indiquen la direcció del vent, les fletxes negres representen el sentit i mòdul d'aquest, i la tonalitat de cada zona segueix l'escala de temperatura que acompanya a cada figura. El primer dia de la simulació dominaren els vents del sud, en especial al litoral, mentre que a l'interior el vent bufava dels sectors est i sud-est. Les temperatures màximes enregistrades voltaven entre els 34-36°C.

Amb el pas de les hores, Catalunya restà en una situació de pantà baromètric que va provocar que els vents a gran escala fossin molt febles i que la brisa de mar cap a terra al sud del país i especialment durant les hores centrals del dia, es fes més intensa, alhora que s'observa un augment progressiu de les temperatures. A la Figura 5.6. es veu aquesta situació de pantà baromètric afectant a tota la zona est de la península i a la zona mediterrània que permet el desenvolupament de la brisa de mar cap a terra.

La situació va ser molt similar fins al dia 15, quan a l'interior els vents van començar a bufar de ponent. Pel que fa a les temperatures, la continuïtat del domini dels vents del sud durant un parell de dies d'una banda, i de l'altra, l'arribada de vents de l'oest per l'interior que procedien d'una intrusió africana pel sud peninsular, va fer que augmentessin progressivament, de forma que el 14 de juny s'assoliren pics de 41°C en algunes estacions de la Xarxa d'Estacions del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC).

La simulació amb el model MM5 mostra temperatures de 36 °C a les 12 UTC del 14 de juny de 2003, com es pot veure a la Figura 5.7., amb desenvolupament de brisa marina, que com s'ha comentat afavoreix l'advecció dels contaminants de zones urbanes cap a zones més rurals on s'acumulen els hidrocarburs emesos per la vegetació.

Dataset: d1 RIP: D1 2003juny10 14      Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 03  
 Fcst: 12.00      Valid: 1200 UTC Tue 10 Jun 03 (0800 MDT Tue 10 Jun 03)  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines      at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors      at height = 0.01 km

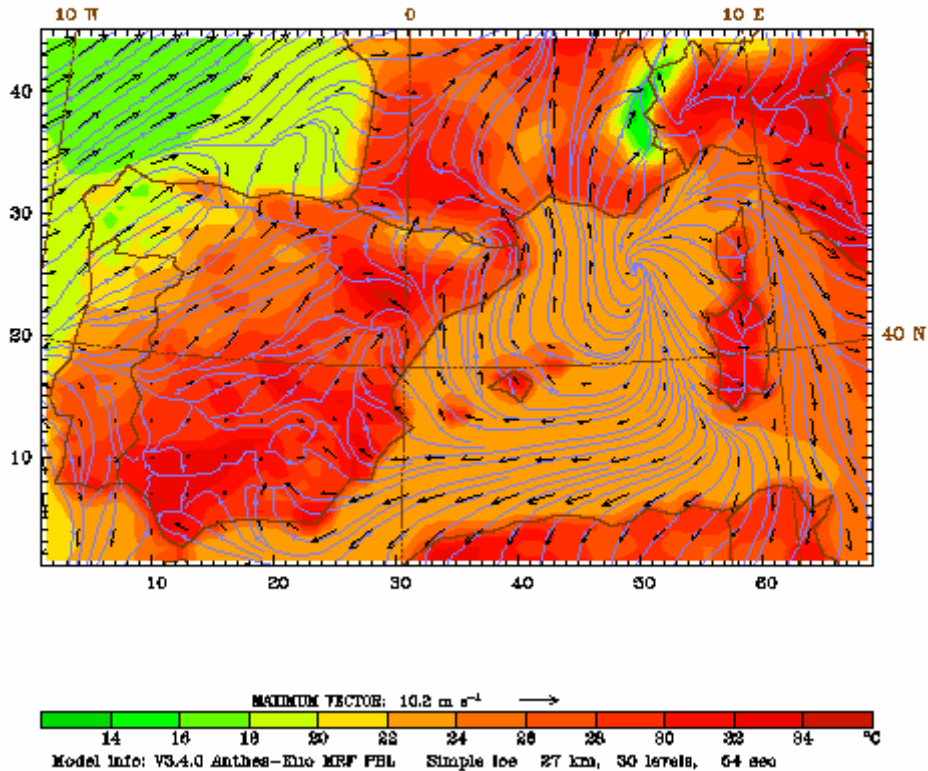


Figura 5.4. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 10 de juny de 2003.

A la Figura 5.4. es pot observar perfectament el règim de vent de mar cap a terra, que a la zona de Catalunya aporta vents predominantment de component sud en les hores centrals del dia i en endavant. Aquest patró del vent s'observa tanmateix en les mesures de les estacions de la xarxa del SMC. Si ens fixem en la component V del vent, per exemple l'estació de Torredembarra, es veu (Figura 5.5.) aquest patró repetitiu en les hores diürnes a partir de mig matí, en canvi a la nit i matinada aquesta component és molt menor. Aquest patró es repeteix per la major part de les estacions.



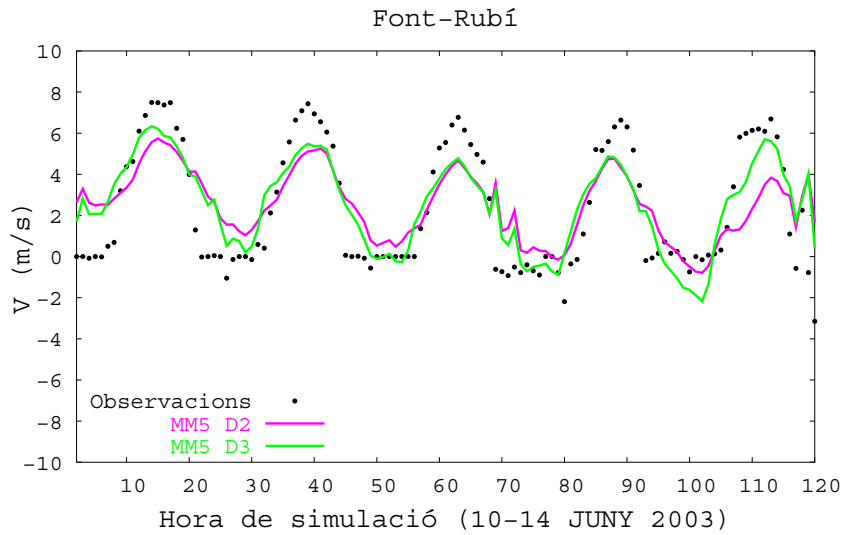
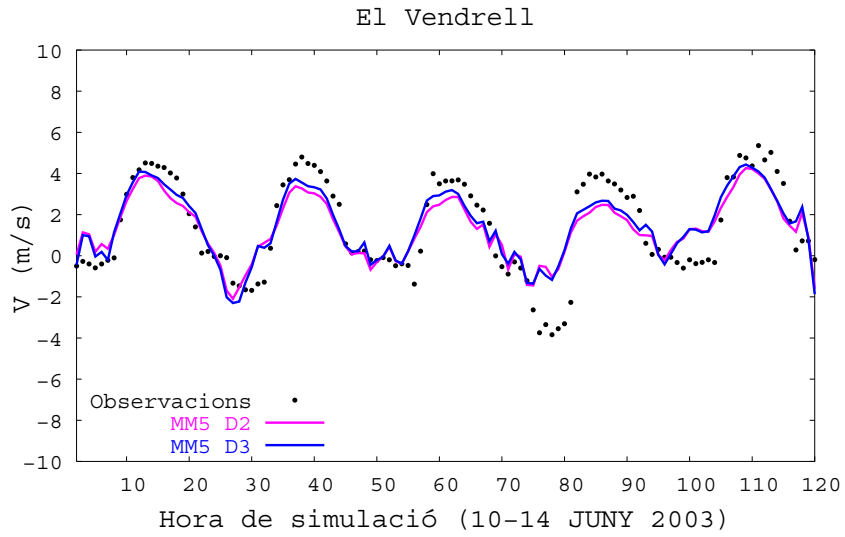
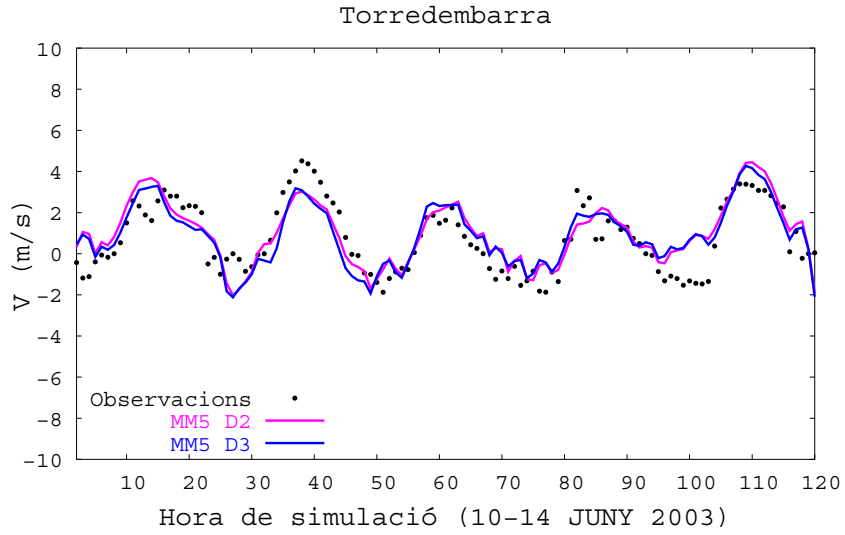


Figura 5.5. Component V del vent observada i simulada per a les estacions de Torredembarra, el Vendrell i Font Rubí del 10 al 14 de juny de 2003.

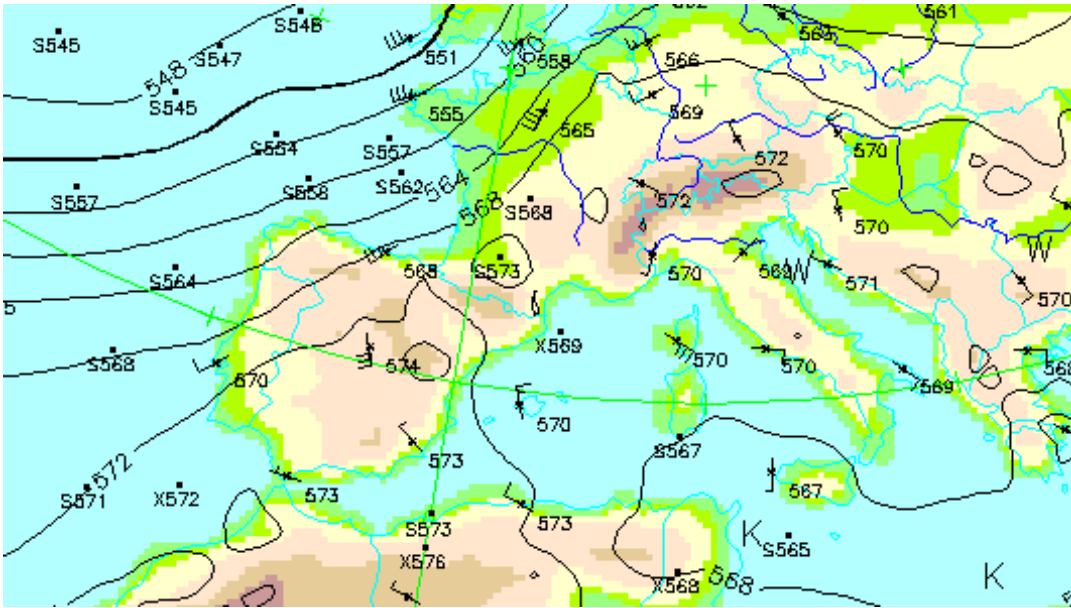


Figura 5.6. Alçada geopotencial (500 hPa) a les 12 UTC del 10 de juny de 2003, reanàlisi del servei meteorològic alemany (DWD).

Dataset: d1 RIP: D1 2003juny10 14 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 03  
 Fcst: 107.99 Valid: 1159 UTC Sat 14 Jun 03 (0659 MDT Sat 14 Jun 03)  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors at height = 0.01 km

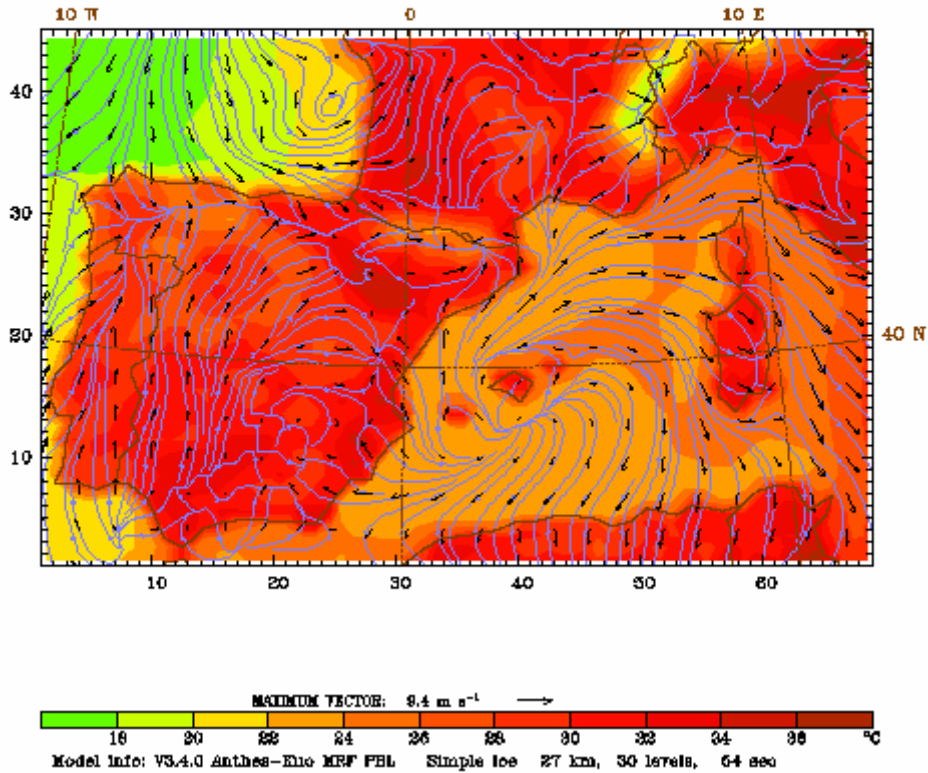


Figura 5.7. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 14 de juny de 2003.

### 5.3.2. Simulació del 1 al 6 de juliol de 2003

El període simulat està dominat a gran escala per una baixa situada sobre Gran Bretanya i un anticicló a les Açores. El flux entre ambdós nuclis afecta a Europa Occidental i per tant a Catalunya impedit l'evolució dels vents locals.

Aquesta situació porta associada la presència d'un fort flux de l'oest sobre la península Ibèrica, i per tant el cicle diürn sota aquesta situació (generalment associat amb el mesoscalar) és poc marcat. Les Figures 5.8. i 5.10. mostren els mapes de temperatura i vent corresponents a les simulacions numèriques realitzades amb el model MM5, pel domini exterior de simulació D1 (27km de resolució). Les línies blaves són línies de corrent que ens indiquen la direcció del vent, les fletxes negres representen el sentit i mòdul d'aquest, i la tonalitat de cada zona segueix l'escala de temperatura que acompanya a cada figura. A la Figura 5.9. es mostren les línies d'alçada geopotencial per la superfície de 500 hPa que mostren el vent del sector oest que afectà a la península en aquestes dates. En els dies posteriors la situació continuà essent similar, si bé la baixa s'anà desfent i els vents s'afebliren arribant en l'últim dia de simulació a permetre el desenvolupament normal de la brisa marina amb valors de vent moderats a causa de les baixes temperatures i del poc gradient de temperatura.

Sobre Catalunya és de destacar la presència de vents forts en els extrems nord i sud, originant vents de tramuntana i canalitzacions en la vall de l'Ebre. Després de la sortida del sol s'aprecia com la brisa no s'acaba imposant a la situació sinòptica fins al segon dia de la simulació. Ja durant aquest dia i al migdia s'observa l'efecte de la brisa a les 15:00 UTC pel litoral central i nord, procedent de latituds inferiors i bloquejada degut als vents de l'oest i nord-oest a escala més gran, que incidia directament en la trajectòria de la brisa. Els dies posteriors (3-4) la tònica va continuar en aquest sentit, amb brises cada vegada més importants, extenses i bloquejades degut a la circulació a major escala. Al final de la simulació la situació anticiclònica es va fer dominant i la brisa s'intensificà i generalitzà a tot el territori.

Les temperatures durant aquest període no van ser extremadament altes com per poder afavorir notablement episodis d'ozó extrems. Així doncs, s'observa com a fet més destacable, la disminució de les temperatures mínimes que va provocar l'entrada de vents del nord-oest. Les màximes a l'inici de la simulació oscil·laven entre els 28 i 32°C (amb pics puntuals de 33 i 34°C), i es produïen al litoral i prelitoral a les hores centrals del dia, baixant durant els dies intermedis del període entre un i dos graus, i tornant als valors inicials un cop la situació anticiclònica va ser la dominant.

Aquest comportament també s'observà en les mesures de les estacions del SMC. En el primer dia de simulació les estacions mesuraren forts vents de l'oest (component U de l'ordre de 8 m/s), en els dies posteriors s'observà un afebliment d'aquesta component a mida que la component V s'anava enfortint. Les temperatures a Catalunya van ser en tot el període moderades per l'època, aquest fet possiblement afectà conjuntament amb la situació en alçada al feble desenvolupament de la brisa marina.

Dataset: d1 RIP: D1 2003jul01 06 Init: 0000 UTC Tue 01 Jul 03  
 Fcst: 12.00 Valid: 1200 UTC Tue 01 Jul 03 (0600 MDT Tue 01 Jul 03)  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors at height = 0.01 km

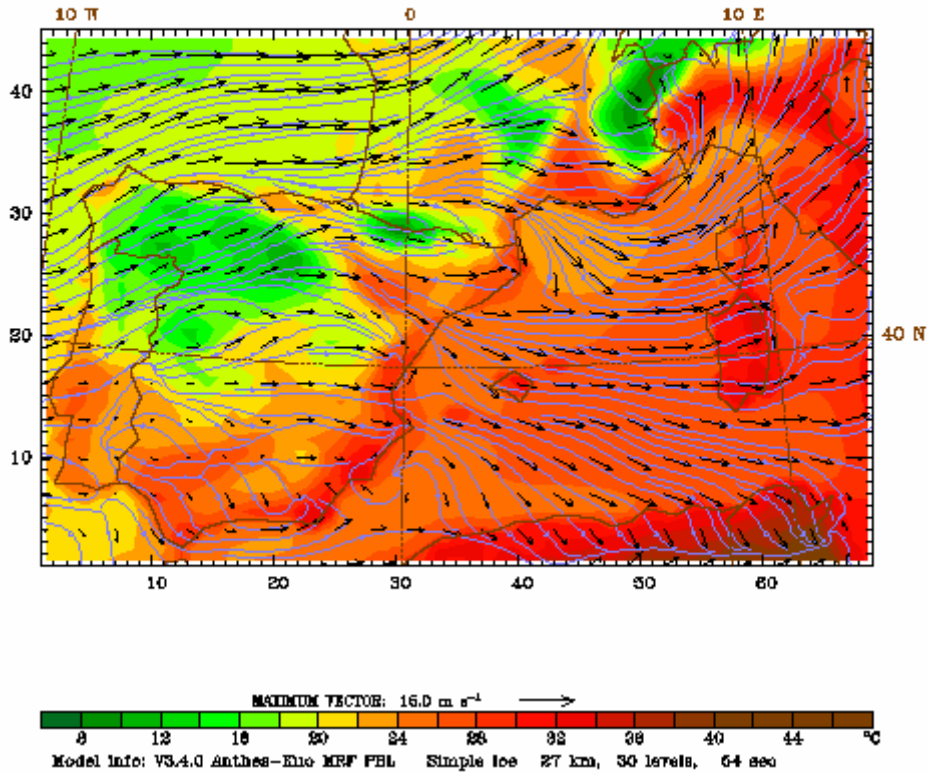


Figura 5.8. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 1 de juliol de 2003.

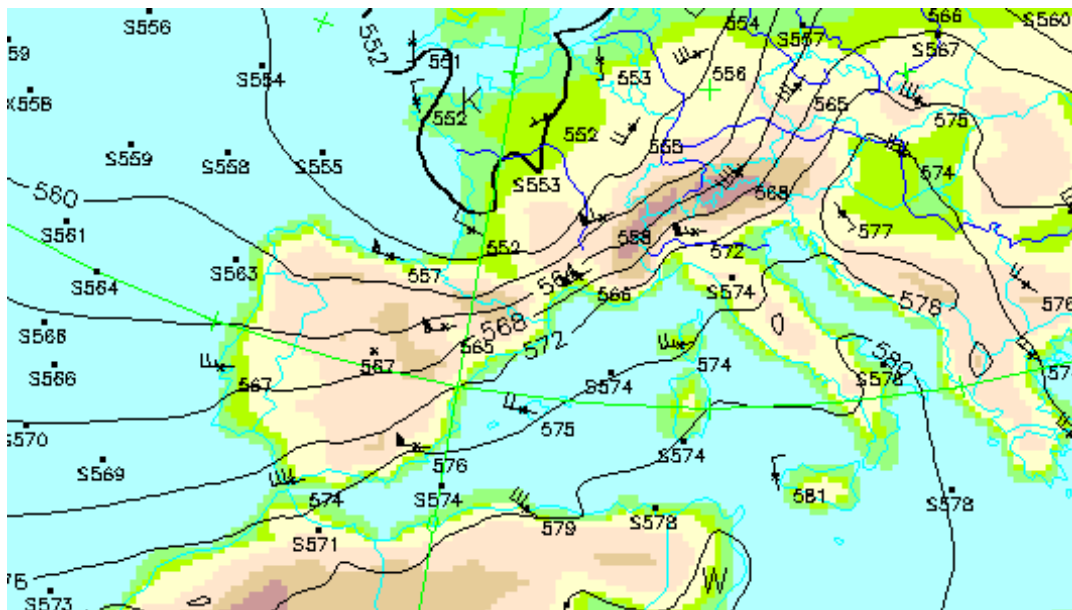


Figura 5.9. Alçada geopotencial (500 hPa) a les 12 UTC del 1 de juliol de 2003, reanàlisi del servei meteorològic alemany (DWD).

Dataset: d1 RIP: D1 bo  
 Fest: 131.99 h  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines  
 Horizontal wind vectors

Init: 0000 UTC Tue 01 Jul 03  
 Valid: 1159 UTC Sun 06 Jul 03 (0559 MDT Sun 06 Jul 03)  
 at height = 0.01 km  
 at height = 0.01 km

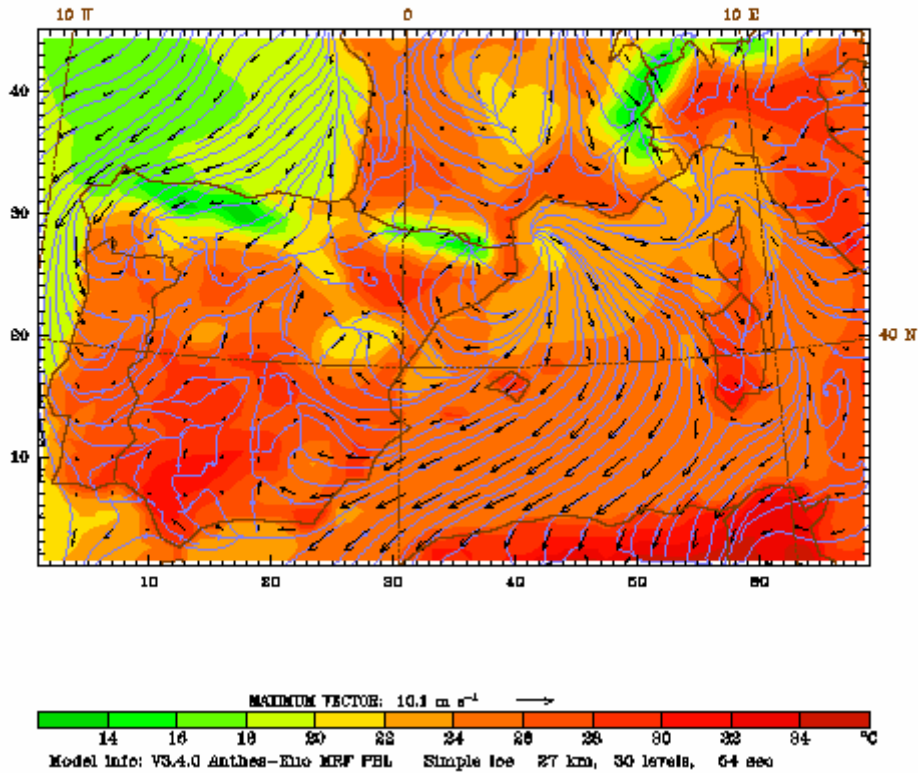


Figura 5.10. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 6 de juliol de 2003.

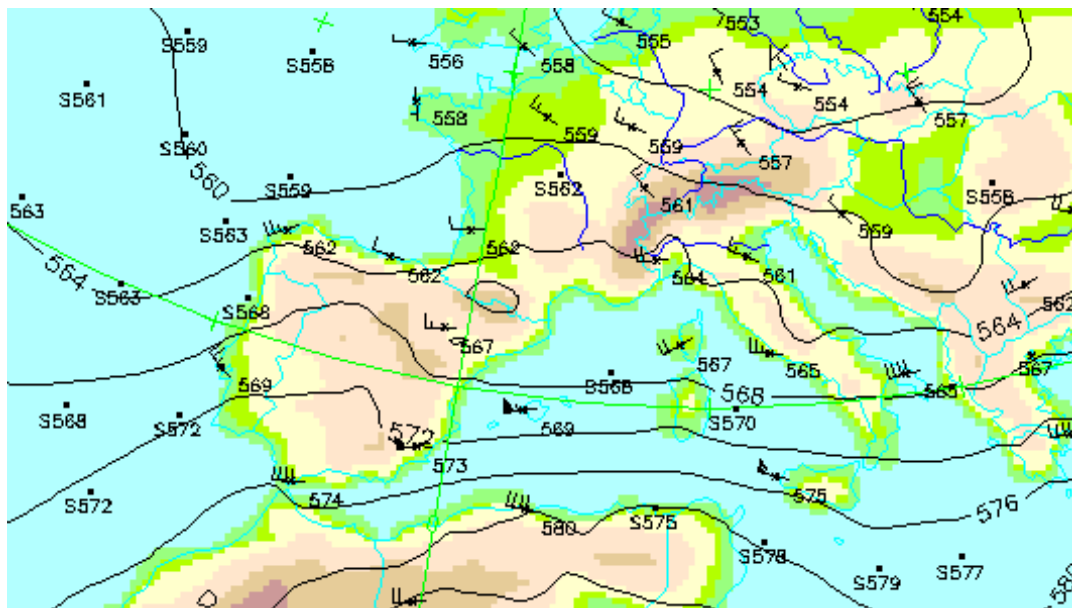


Figura 5.11. Alçada geopotencial (500 hPa) a les 12 UTC del 6 de juliol de 2003, reanàlisi del servei meteorològic alemany (DWD)

### 5.3.3. Simulació de l'1 al 10 d'agost de 2003

El període simulat està dominat a gran escala per una situació sinòptica que afectà poc al patró de vent originat a Catalunya. Les Figures 5.12., 5.14., 5.16., 5.17. mostren els mapes de temperatura i vent corresponents a les simulacions numèriques realitzades amb el model MM5, per al domini exterior de simulació D1 (27km de resolució). Les línies blaves són línies de corrent que indiquen la direcció del vent, les fletxes negres representen el sentit i mòdul d'aquest, i la tonalitat de cada zona segueix l'escala de temperatura que acompanya a cada figura. A la Figura 5.13. es mostren les línies d'alçada geopotencial per a la superfície de 500 hPa per a l'1 d'agost.

Inicialment hi ha una baixa sobre Itàlia (Figura 5.12. i 5.13.) que crea un flux de vent del nord sobre el mar Mediterrani. Aquesta situació es desfà donant pas a un anticicló sobre les Açores que s'instal·larà durant una setmana. Deixant el nord-oest de la península Ibèrica sense cap règim dominant en alçada, permetent el desenvolupament del règim mesoscalar de vents. El reanàlisi per l'1 d'agost (Figura 5.13.) coincideix amb aquest flux del nord que entrava en el Mediterrani (Figura 5.12.).

Dataset: d1 RIP: D1 2003agost01 07 Init: 0000 UTC Fri 01 Aug 03  
Fest: 12:00 Valid: 1200 UTC Fri 01 Aug 03 (0600 MDT Fri 01 Aug 03)  
Surface air temperature  
Horizontal wind streamlines at height = 0.01 km  
Horizontal wind vectors at height = 0.01 km

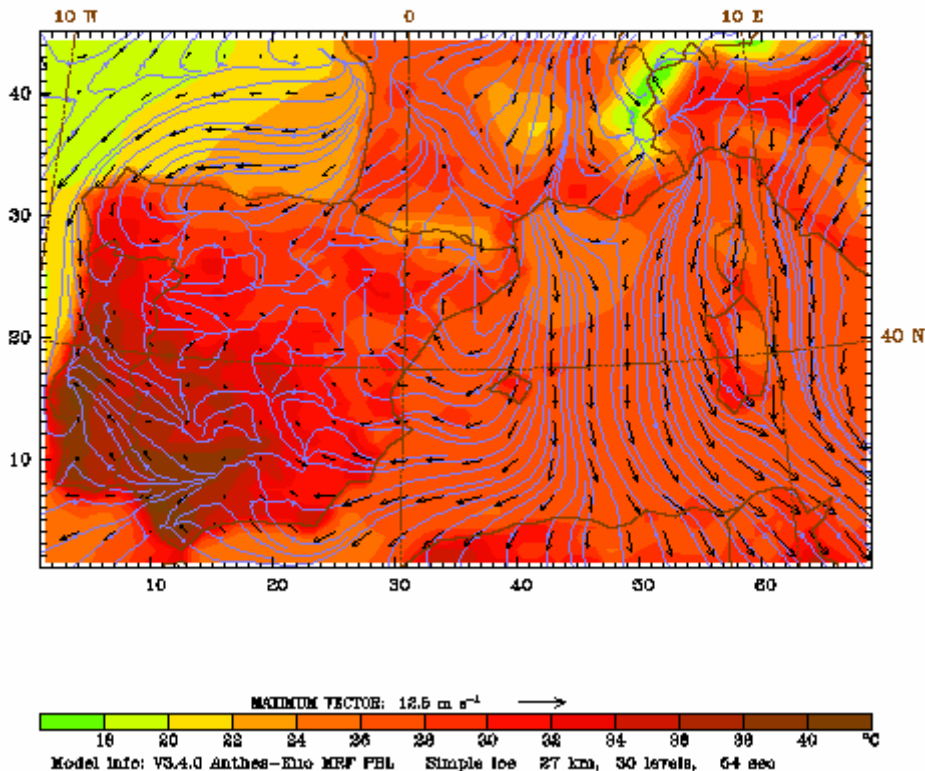


Figura 5.12. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 1 d'agost de 2003.

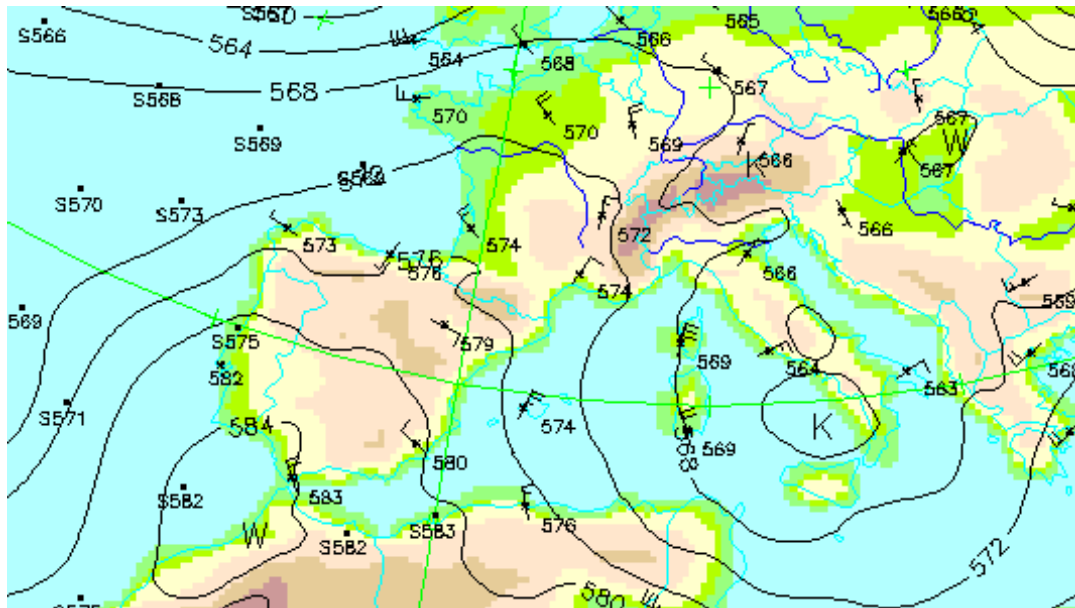


Figura 5.13. Alçada geopotencial (500 hPa) a les 12 UTC del 1 d'agost de 2003, reanàlisi del servei meteorològic alemany (DWD).

Dataset: d1 RIP: D1 2003agost01 07 Init: 0000 UTC Fri 01 Aug 03  
 Fcst: 107.99 Valid: 1159 UTC Tue 05 Aug 03 (0659 MDT Tue 05 Aug 03)  
 Surface air temperature at height = 0.01 km  
 Horizontal wind streamlines at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors at height = 0.01 km

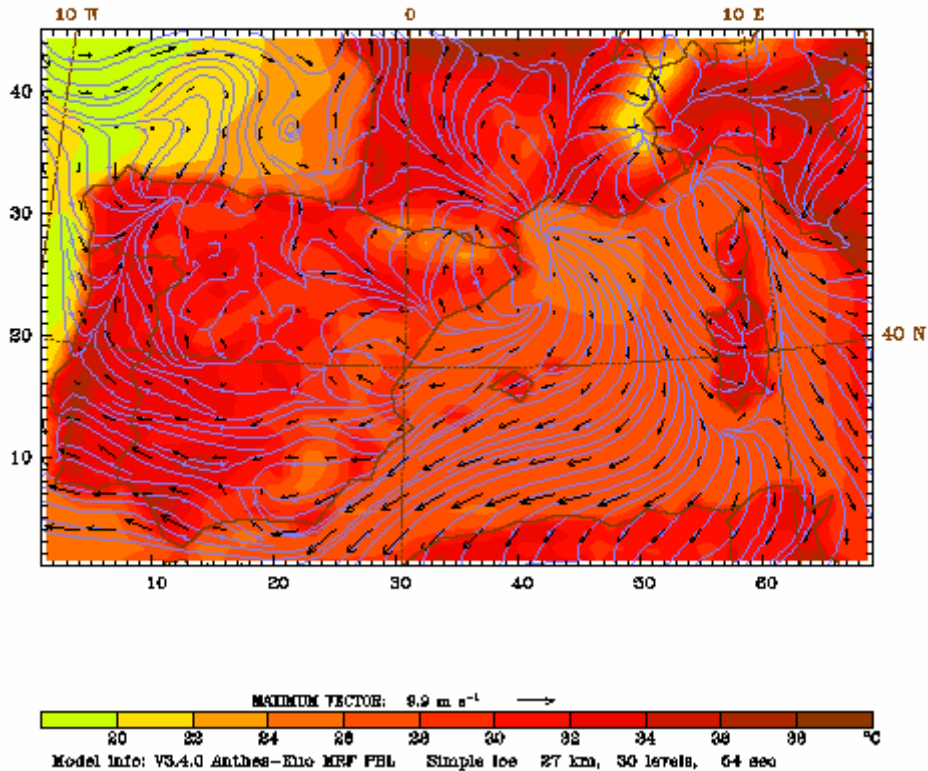


Figura 5.14. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 5 d'agost de 2003.

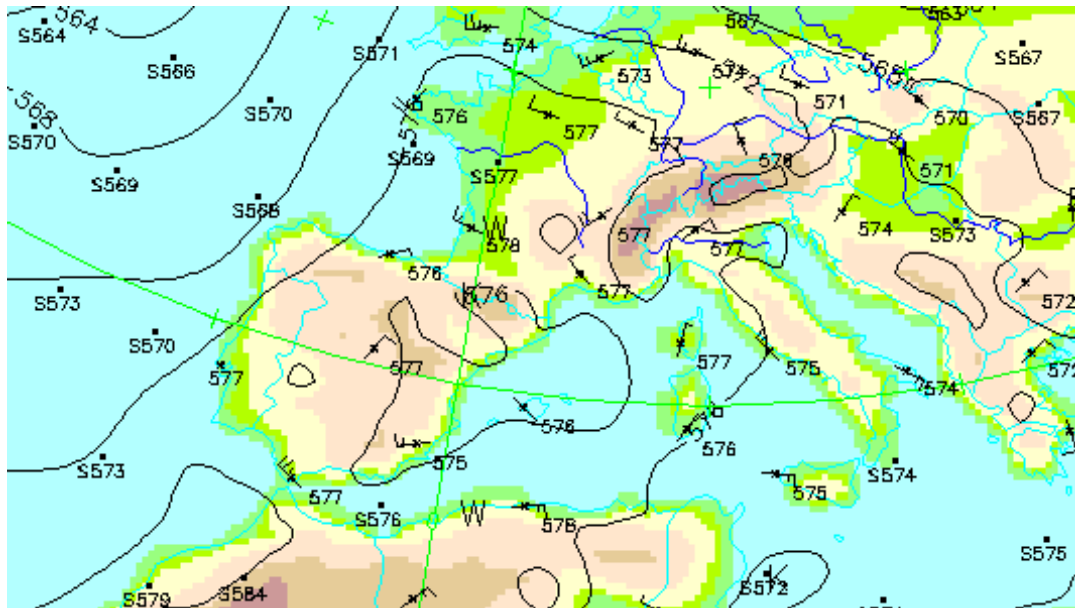


Figura 5.15. Alçada geopotencial (500 hPa) a les 12 UTC del 5 d'agost de 2003, reanàlisi del servei meteorològic alemany (DWD).

Dataset: d1 RIP: D1 2003agost08 10 Init: 0000 UTC Wed 06 Aug 03  
 Fcst: 60.00 Valid: 1159 UTC Fri 08 Aug 03 (0559 MDT Fri 08 Aug 03)  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors at height = 0.01 km

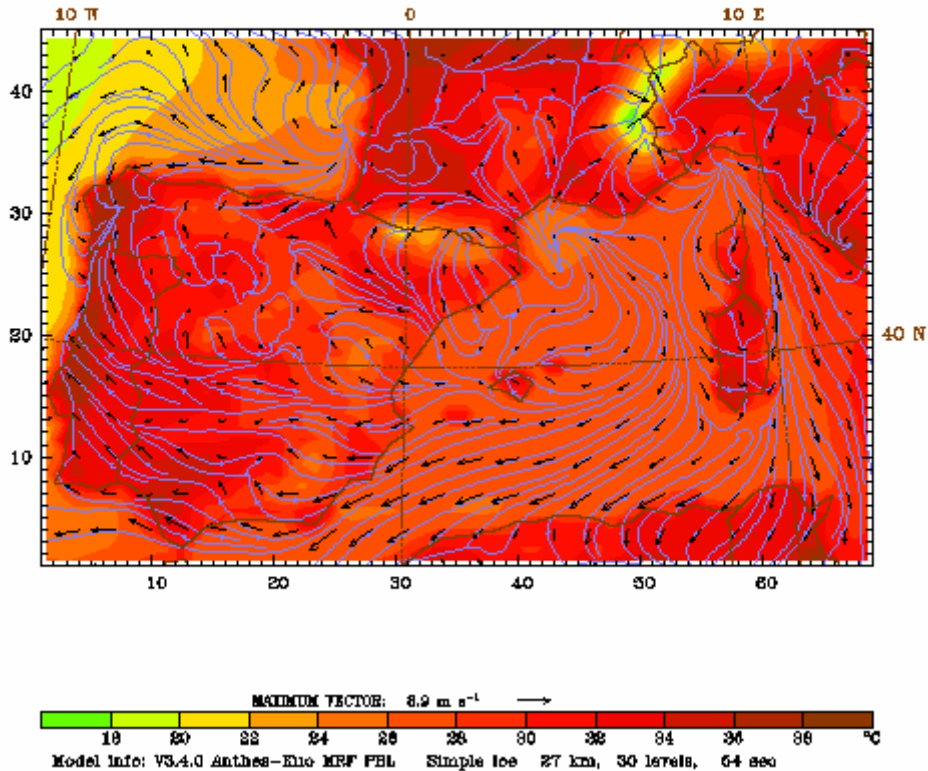


Figura 5.16. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 8 d'agost de 2003.



Dataset: d1 RIP: D1 2003agost08 10      Init: 0000 UTC Wed 08 Aug 03  
 Fcst: 107.99      Valid: 1159 UTC Sun 10 Aug 03 (0559 MDT Sun 10 Aug 03)  
 Surface air temperature  
 Horizontal wind streamlines      at height = 0.01 km  
 Horizontal wind vectors      at height = 0.01 km

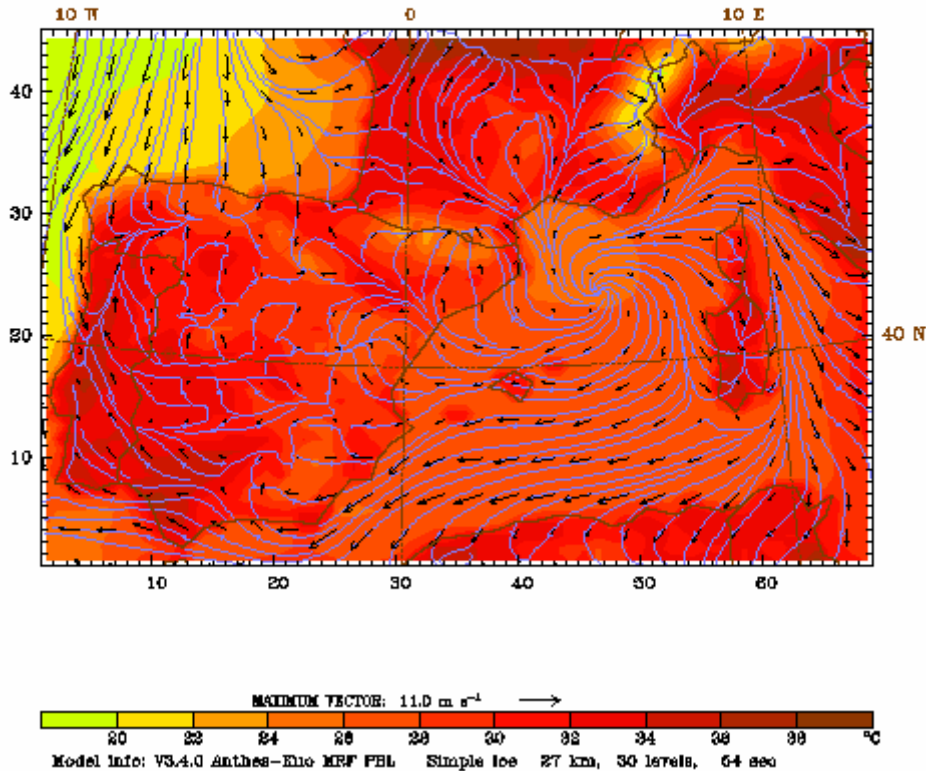


Figura 5.17. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D1 amb MM5 per a les 12UTC del dia 10 d'agost de 2003.

La Figura 5.15. mostra l'alçada geopotencial per a la superfície de 500 hPa a les 12UTC del 5 d'agost, mostrant una situació d'alta relativa, poc definida en quan a règim de vents en alçada. La simulació amb el model meteorològic MM5 mostra vents de mar cap a terra a les 12UTC a la zona de Catalunya (com es pot veure a les Figures 5.20. i 5.21.). Les temperatures en aquest període van ser elevades, i el model és en aquesta simulació on dóna les temperatures més elevades, en relació als altres períodes simulats, si bé no és capaç de reproduir les altes temperatures observades en aquests dies tal i com es veurà en la validació amb les estacions de mesura.

#### 5.4. Entrada de la brisa marina

S'han representat els camps de vent i de temperatura per a les 12 UTC de tots els dies simulats en el domini D2 (veure Figures 5.18 a 5.21). Es pot observar el desenvolupament de règims de vent de mar cap a terra a aquesta hora per tots els dies en el primer període simulat (juny) i també en el darrer període (agost). En canvi en la situació de domini del vent de l'oest durant el segon període (juliol) es veu com el primer dia hi ha una situació sinòptica dominant que impossibilita la formació de la brisa de mar cap a terra; el següent dia es comença a desenvolupar una brisa marina que queda frenada pel règim de vent de l'oest, tot i que es va fent més dèbil i en els dies posteriors la brisa penetra més terra endins.

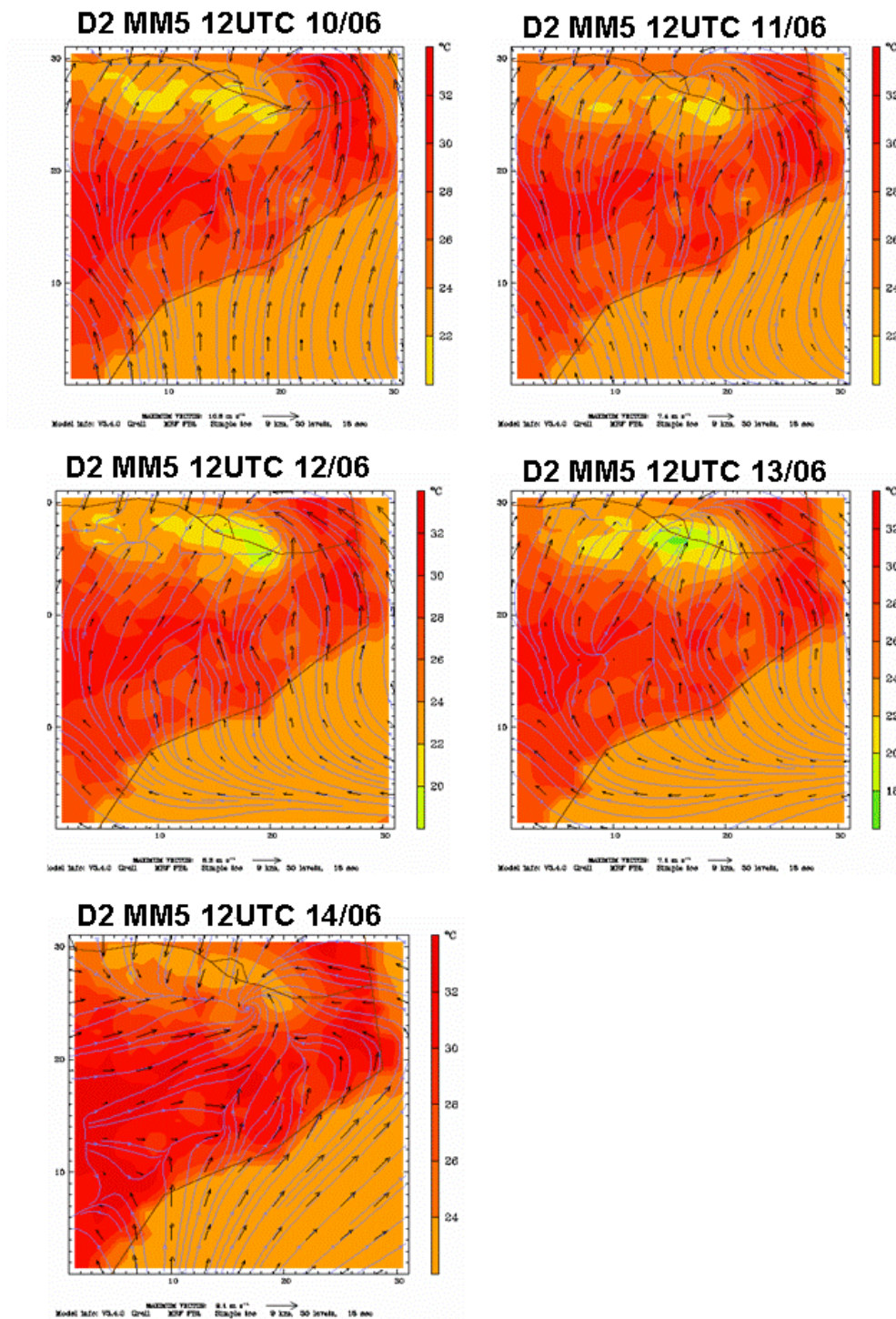


Figura 5.18. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D2 amb MM5 per les 12UTC dels dies 10 al 14 de juny de 2003.

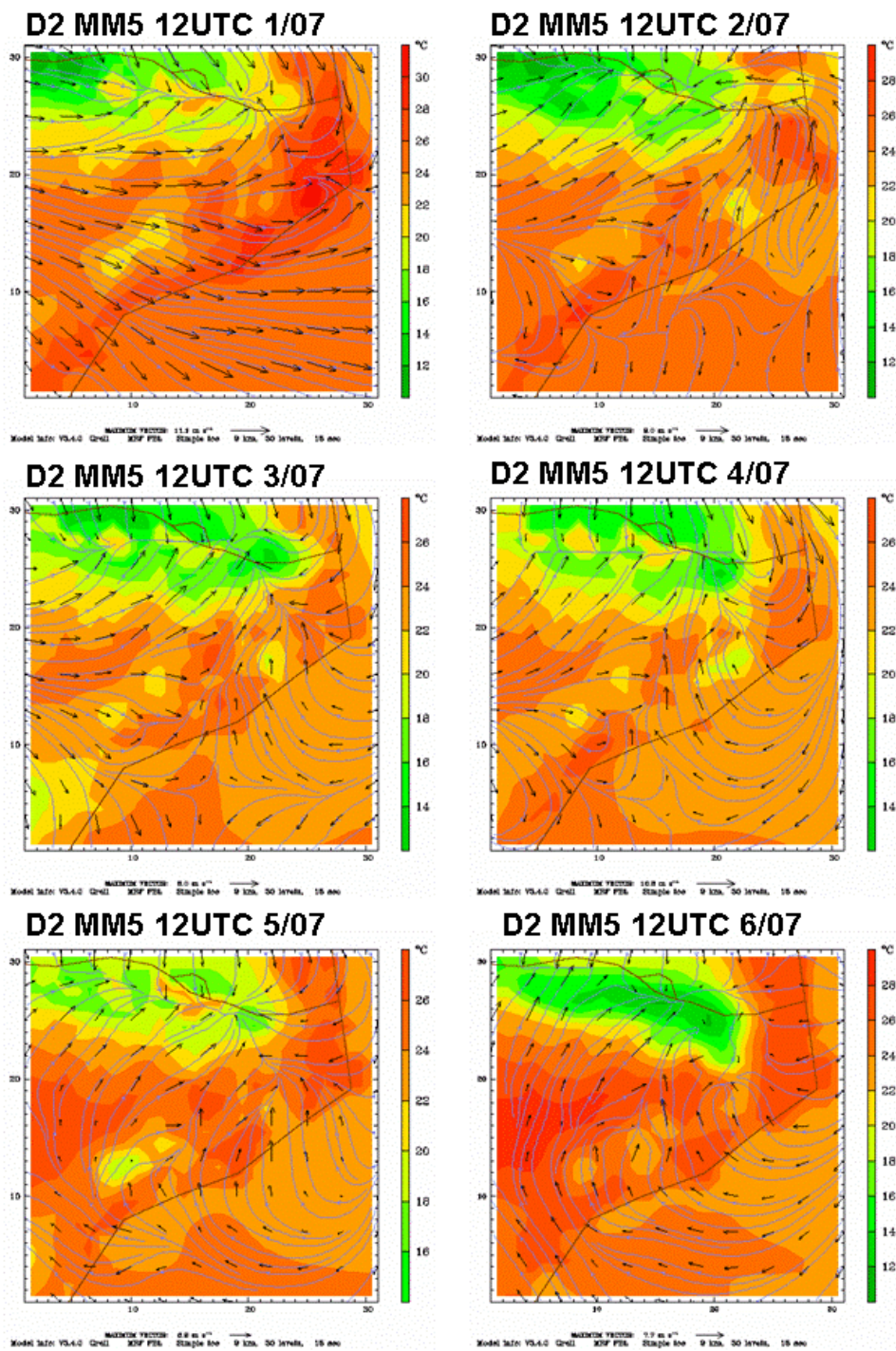


Figura 5.19. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D2 amb MM5 per les 12UTC dels dies 1 al 6 de juliol de 2003.

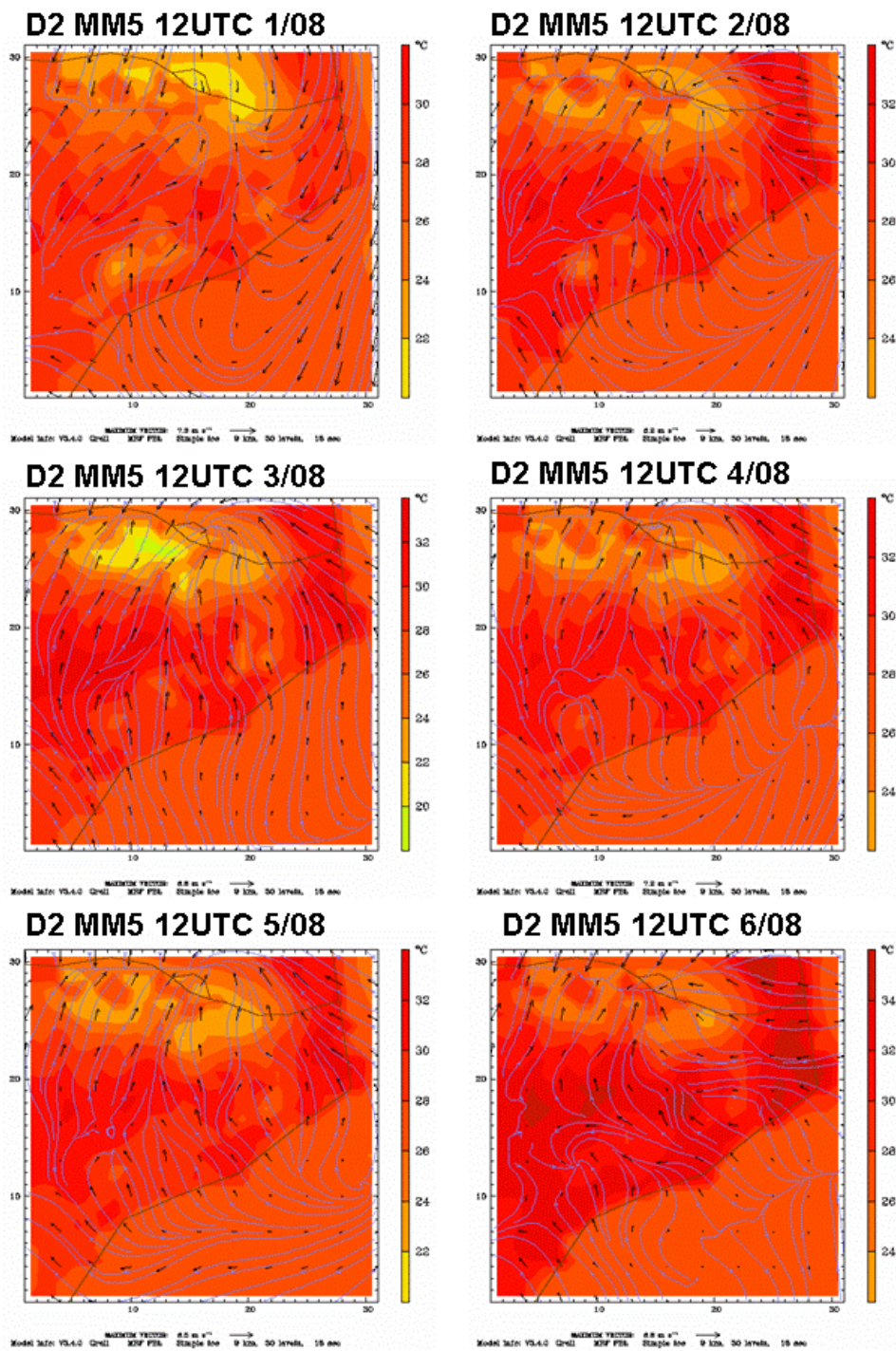


Figura 5.20. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D2 amb MM5 per les 12UTC dels dies 1 al 6 d'agost de 2003.

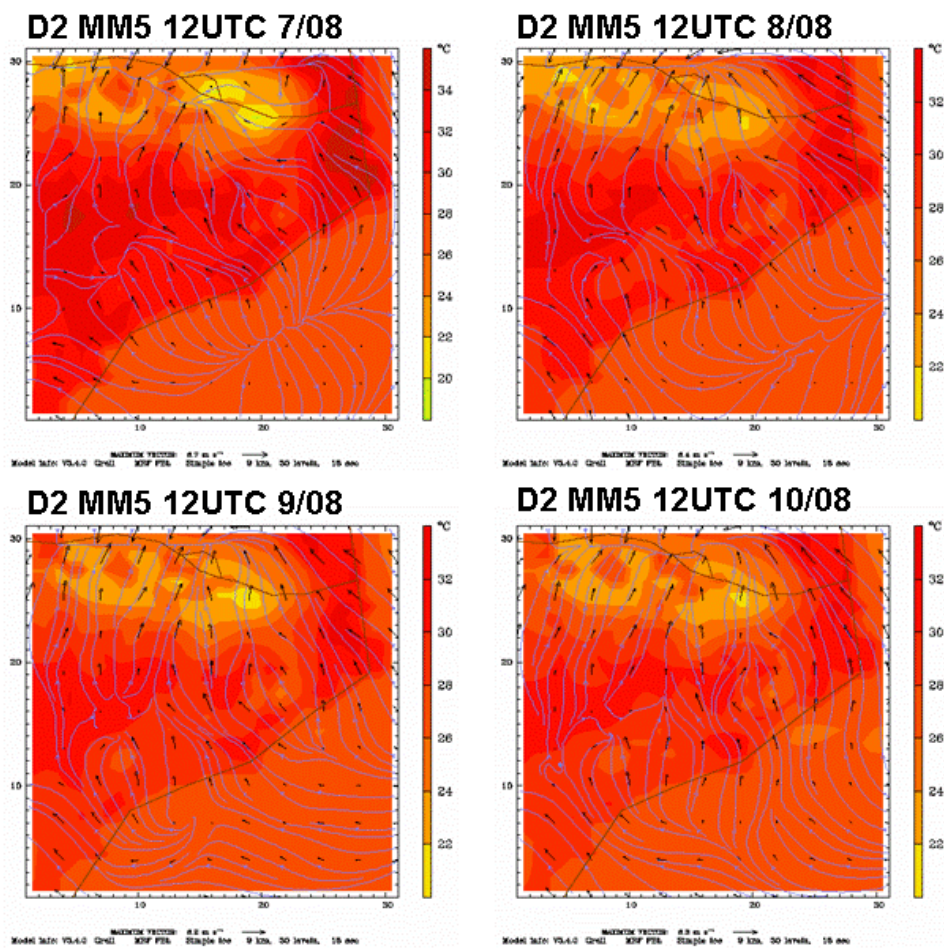


Figura 5.21. Camp de vent a 10m i temperatura en superfície (2m) de la simulació en el domini D2 amb MM5 per les 12UTC dels dies 7 al 10 d'agost de 2003.

Els vents de sud-est, sud i sud-oest són els predominants al migdia solar. Es pot observar en les gràfiques de les estacions (veure Figura 5.5.) com la component V del vent segueix un patró totalment lligat al patró de temperatures i que només s'altera per al dia 1 de juliol de 2003 (Figura 5.22), i esdevé menys marcat per als dies successius.

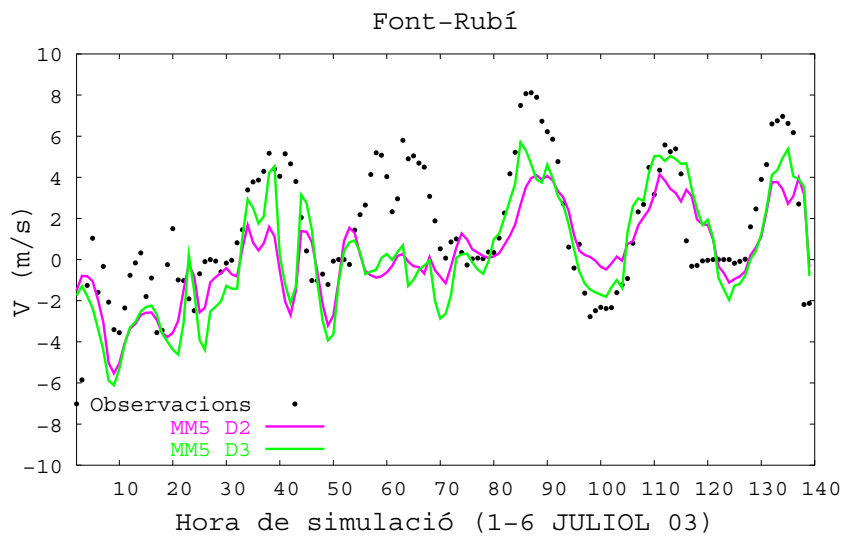
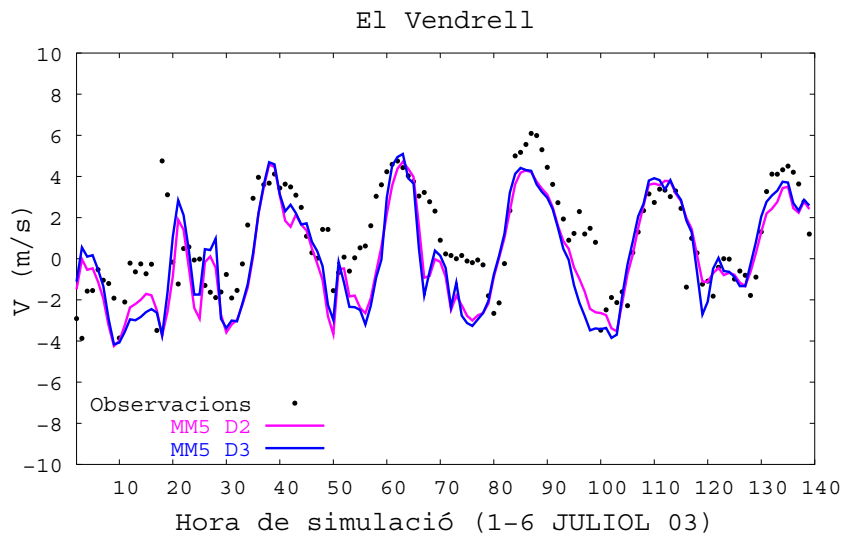
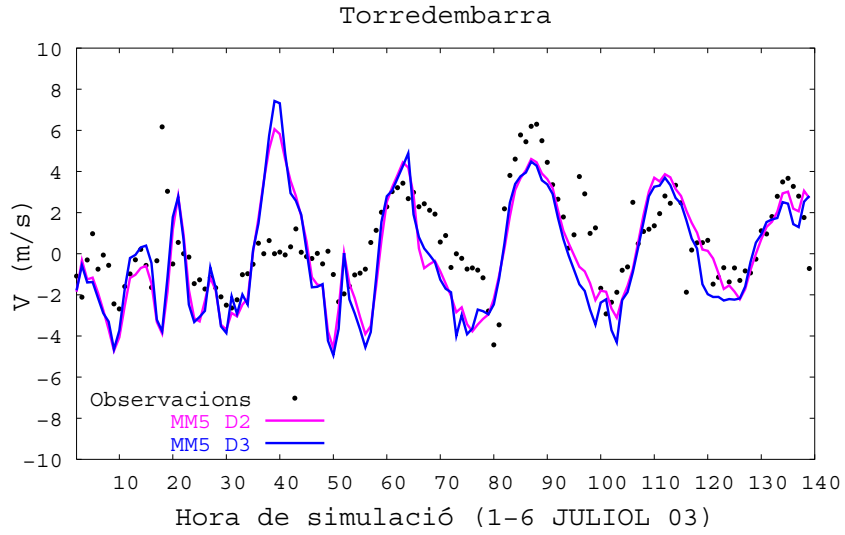


Figura 5.22. Component V del vent observada i simulada per a les estacions de Torredembarra, el Vendrell i Font Rubí.

## 5.5. Validació de la simulació meteorològica

La xarxa d'estacions meteorològiques gestionada i distribuïda pel SMC que cobreix gran part del territori català, amb més representació en les àrees més poblades. Donat que el model calculava la temperatura a 2 metres i el vent a 10 metres, s'han considerat les dades de les estacions que també donaven aquestes dades en aquestes condicions per mantenir la coherència en la comparació. Finalment s'han escollit les estacions coincidents en el domini de 9 km de resolució i el domini de 3 km de resolució per tal de poder fer una comparació de l'actuació del model en ambdós dominis.

Un cop recopilades les mesures existents de vent i temperatura, s'han calculat els estadístics per als valors de vent amb mòdul mesurat superior a 0.7 m/s, per tal d'eliminar els valors més petits que la precisió de l'aparell, considerant, a més que normalment són valors nocturns i tenen poc interès en la simulació d'ozó. Per a les components U i V del vent s'ha aplicat aquesta restricció per als valors en mòdul inferiors a 0.5 m/s. Aquest és el motiu de que en l'aplicació dels estadístics hi hagi un número diferent de valors considerats per a cada variable considerada, essent idèntic en el mòdul del vent i la direcció ja que la restricció es va aplicar per al mòdul del vent .

S'han utilitzat els estadístics clàssics descrits a continuació per considerar que són els més adients i els que presenten una informació més entenedora. Es calculen els valors promitjos observats i simulats per tot el conjunt de dades considerat, que són les dades existents que compleixen les condicions descrites anteriorment, N es refereix al nombre de dades considerat, O als valors observats, i M als valors modelitzats o simulats. El resultat òptim seria que el promig dels valors observats fos aproximadament el promig dels valors simulats. El coeficient de regressió dóna idea de la dispersió de les dades comparades, el valor òptim és 1. La desviació (bias,  $B_{MB}$ ) mostra si els valors del model van per sobre de les observacions (valor positiu) o per sota (valor negatiu), si el valor s'apropa a zero indica que no hi ha una tendència clara del model en vers les observacions. L'error absolut mig ( $E_{MAGE}$ ) permet veure si la desviació s'acosta molt o poc a ell, tant si hi ha una tendència clara per part del model de sobreestimar o subestimar a tota la zona com si no. L'error quadràtic mig ( $E_{RMSE}$ ) mostra l'error de la simulació en vers cadascuna de les variables, el valor òptim seria 0 o valors propers. Per acabar els valors normalitzats ( $B_{MNB}$ ,  $E_{MNAE}$ ) de la desviació i de l'error absolut donen idea de l'error en relació als valors, per tal de que els errors en dades de baix valor numèric tinguin el pes que els hi correspon i no quedin apantallats pels errors de les dades d'alt valor numèric.

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum O_i \quad (6)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum M_i \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\left\{ \sum (M_i - \bar{M})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2 \right\}^{1/2}} \quad (8)$$

$$B_{MB} = \frac{1}{N} \sum M_i - O_i = \bar{M} - \bar{O} \quad (9)$$

$$E_{MAGE} = \frac{1}{N} \sum |M_i - O_i| \quad (10)$$

$$E_{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum (M_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$B_{MNB} = \frac{1}{N} \sum \left( \frac{M_i - O_i}{O_i} \right) = \left( \frac{1}{N} \sum \frac{M_i}{O_i} - 1 \right) \quad (12)$$

$$E_{MNAE} = \frac{1}{N} \sum \frac{|M_i - O_i|}{O_i} \quad (13)$$

S'ha fet la validació per a cada període i per a totes les simulacions. Si observem la validació global de l'actuació del model en el domini D2 (Taula 5.1.), amb resolució 9 km, observem que l'error quadràtic mig per a la direcció és de  $77.6^\circ$ , per al mòdul del vent és de 1.71 m/s i per a la temperatura és de 3.5 K. La bias negativa per la temperatura -1.7 ens indica que el model tendeix a fer una predicció per sota d'aquesta variable, la qual cosa ja es pot observar en els gràfics de les estacions vers el model (veure Figures 5.23. i 5.24.). Es veu que els màxims de temperatura són més alts en les estacions de mesura; una possible causa d'aquesta discrepància es pot atribuir a la humitat del sòl, la considerada en el model MM5 podria ser més alta que la que li correspon realment. En el mòdul del vent s'observa que el model tendeix a donar valors més elevats que els mesurats, si bé en les components no és tan clara aquesta condició a causa de l'error considerable que existeix en la direcció del vent.

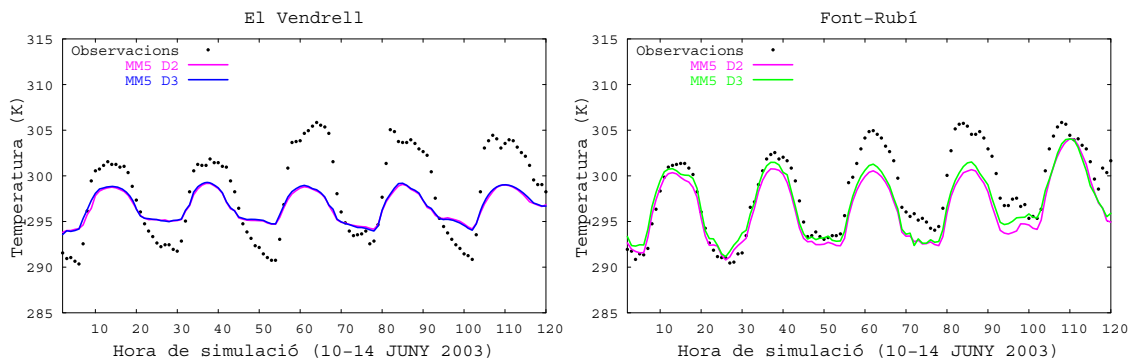


Figura 5.23. Temperatura observada i simulada per les estacions del Vendrell i Font Rubí del 10 al 14 de juny de 2003.

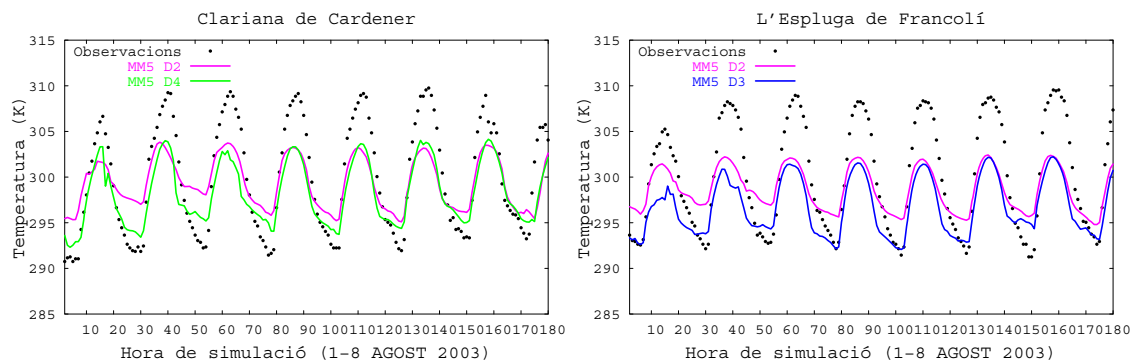


Figura 5.24. Temperatura observada i simulada per les estacions de Clariana de cardener i l'Espluga de Francolí del 10 al 14 de juny de 2003.



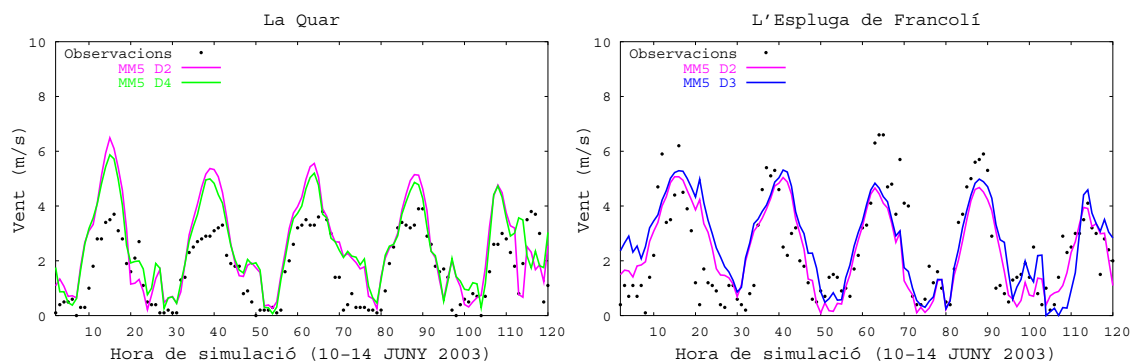


Figura 5.25. Mòdul del vent observat i simulat a les estacions de La Quar i l'Espluga del Francolí del 10 al 14 de juny de 2003.

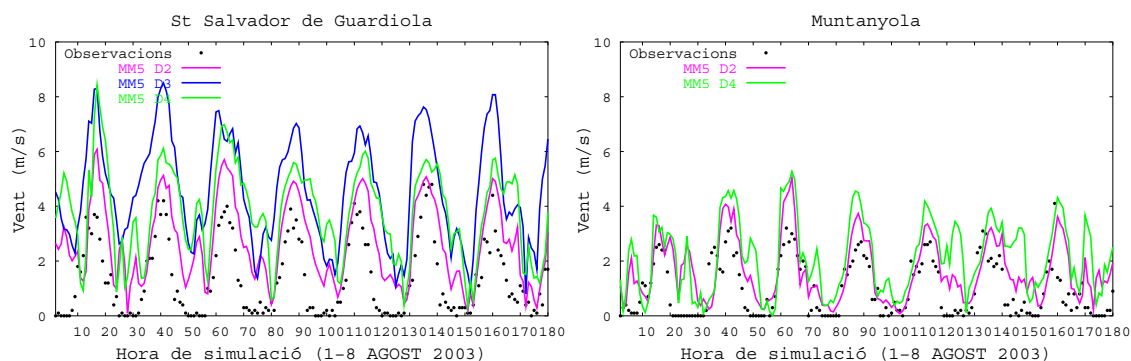


Figura 5.26. Mòdul del vent observat i simulat per a les estacions de St. Salvador de Guardiola i Muntanyola del 1 al 8 d'agost de 2003.

Taula 5.1. Validació conjunta de les simulacions en el domini D2.

Tots períodes	Dir (°)	M (m/s)	U (m/s)	V (m/s)	T (K)
	<b>D2</b>	<b>D2</b>	<b>D2</b>	<b>D2</b>	<b>D2</b>
<b>Observat(O)</b>	183.5	2.91	0.20	1.69	298.2
<b>MM5 (M)</b>	190.6	2.91	0.33	1.59	296.6
<b>N</b>	6814	6814	5361	5860	9368
<b>R</b>	0.668	0.583	0.472	0.57	0.86
<b>B<sub>MB</sub></b>	2.74	0.40	0.097	-0.095	-1.7
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	60.3	1.36	1.73	1.62	2.9
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	77.6	1.71	2.25	2.06	3.5
<b>B<sub>MNB</sub></b>	0.472	1.40	0.079	0.17	-0.0054
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	0.707	1.69	1.22	1.04	-0.0097

La validació global del model en els dominis amb resolució 3 km (Taula 5.2.), no millora els resultats en vers a la validació del domini a 9 km, més aviat són una mica pitjors. Així l'error quadràtic mig per al mòdul del vent és en aquesta resolució de 2.37 m/s, respecte la direcció del vent és lleugerament millor però continua sent del mateix

ordre, 75.5 ° (en vers els 77.6 ° del domini D2). L'error en la temperatura també continua essent molt similar, 3.5 K.

Taula 5.2. Validació conjunta de les simulacions en els dominis D3 i D4.

<b>Tots períodes</b>	<b>Dir (°)</b>	<b>M (m/s)</b>	<b>U (m/s)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>T (K)</b>
	<b>D3+D4</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D3+D4</b>
<b>Observat(O)</b>	182.6	2.88	0.20	1.70	298.2
<b>MM5 (M)</b>	175.6	3.49	-0.27	1.69	296.7
<b>N</b>	9057	9057	7067	7744	12692
<b>R</b>	0.708	0.408	0.425	0.528	0.852
<b>B<sub>MB</sub></b>	-3.8	1.03	-0.50	-0.011	-1.51
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	58.8	1.89	2.13	1.77	3.0
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	75.5	2.37	2.82	2.27	3.6
<b>B<sub>MNB</sub></b>	0.425	2.37	-0.48	0.25	-0.0048
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	0.707	2.61	1.66	1.16	-0.010

La validació per a cada període simulat i per les diferents resolucions es pot veure de la Taula 5.3. a la Taula 5. 7. Respecte la temperatura observem que la desviació és sempre negativa, això ens indica que el model tendeix a predir una temperatura inferior a la que mesura l'estació. D'altra banda el major error quadràtic és per a la simulació d'agost de l'1 al 8 d'agost, per als dominis amb resolució 3 km, prenent el valor de 4 K. En aquest període es van donar temperatures elevades, en quan a l'error normalitzat també és el major en aquest període, si bé és igual al del mateix domini per la següent simulació de l'agost (6 al 10 d'agost) amb un error de l'1.1 %. La simulació amb menor error és la del domini amb resolució 9 km, per al període del juliol, amb un error de 2.7 K.

Taula 5.3. Validació per períodes i dominis del model MM5 per a la temperatura en superfície (a 2 m).

<b>T (K)</b>	<b>030610</b>		<b>030701</b>		<b>030801</b>		<b>030806</b>	
	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>
<b>O</b>	297.9	297.8	295.0	295.1	299.9	299.8	299.7	299.7
<b>MM5</b>	296.5	296.7	293.3	293.5	297.8	297.9	298.4	298.4
<b>N</b>	2026	2746	2288	3116	3048	4116	2006	2714
<b>r</b>	0.906	0.895	0.867	0.836	0.894	0.892	0.7896	0.796
<b>B<sub>MB</sub></b>	-1.34	-1.11	-1.72	-1.58	-2.08	-1.89	-1.295	-1.23
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	2.86	3.05	2.17	2.19	3.27	3.36	3.24	3.33
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	3.42	3.65	2.67	2.73	3.89	4.02	3.82	3.95
<b>B<sub>MNB</sub></b>	-0.0043	-0.0035	-0.0058	-0.0053	-0.0067	-0.0061	-0.0041	-0.0039
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	0.0096	0.0102	0.0073	0.0074	0.0108	0.011	0.0107	0.011

En la validació del mòdul del vent i de la direcció del vent s'ha imposat la condició de que el valor mesurat per l'estació fos superior a 0.7 m/s per tal d'evitar els valors massa petits, que introduirien un major error en la direcció del vent. La desviació és per tots els períodes validats positiva i la normalitzada també; per tant el model està estimant per sobre el mòdul del vent en tots els períodes. L'error quadràtic mig està comprès entre 1.4 m/s (en el primer període d'agost domini D2) i 2.45 m/s (en el període del juny dominis inferiors). L'error normalitzat ens dóna valors des de 146 % d'error fins a 300 % d'error en el període de juny amb resolució 3 km, altres autors troben errors del mateix ordre. Per exemple a Zhang et al. (2006), en una simulació per als Estats Units de l'1 al 10 de juliol de 1999 amb una resolució de 8 km, mostren que l'error quadràtic mig pel mòdul del vent és de 1.62 m/s i l'error normalitzat dóna un valor del 195 %.

Si observem les figures de comparació de les estacions amb els diferents dominis, veiem com l'acord entre els dominis és en general major que entre el valor mesurat i el predit. També veiem que la discrepància es manté per a algunes estacions en els diferents períodes; per exemple, la discrepància en les estacions de St. Llorenç Savall (Figura 5.27.) per a tots els períodes. Aquest fet porta a plantejar-se si la ubicació de les estacions és representativa de cada zona o només aporten informació local. En aquest estudi no s'ha fet cap mena de discriminació de les estacions, en treballs posteriors es preveu fer un anàlisi de la fiabilitat de cada estació respecte la seva localització.

Taula 5.4. Validació per períodes i dominis del model MM5 pel mòdul del vent en superfície (a 10 m).

<b>M(m/s)</b>	<b>030610</b>		<b>030701</b>		<b>030801</b>		<b>030806</b>	
	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>	<b>D2</b>	<b>D3+D4</b>
<b>O</b>	2.91	2.87	3.36	3.31	2.62	2.60	2.77	2.75
<b>MM5</b>	3.24	3.68	3.55	3.92	2.39	3.11	2.49	3.30
<b>N</b>	1399	1875	1857	2520	2156	2826	1402	1836
<b>r</b>	0.574	0.442	0.578	0.492	0.588	0.295	0.537	0.295
<b>B<sub>MB</sub></b>	0.82	1.25	0.45	0.85	0.17	1.01	0.27	1.09
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	1.50	1.93	1.56	1.89	1.14	1.81	1.27	1.96
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	1.91	2.45	1.97	2.35	1.40	2.29	1.55	2.43
<b>B<sub>MNB</sub></b>	2.12	2.83	1.21	1.75	1.13	2.46	1.38	2.63
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	2.33	3.05	1.48	2.00	1.46	2.72	1.70	2.88

En la validació de la direcció del vent s'ha agafat la diferència entre el valor mesurat i el valor predit pel model, de manera que no sobrepassés mai els 180°; errors majors a aquest valor serien falsos i estarien magnificant l'error. D'altra banda aquesta restricció fa que la desviació no tingui sentit per a aquesta variable. Els valors normalitzats també estan exempts de rellevància, ja que dóna més importància a un error en un grau per direccions en el primer quadrant que en el segon. Per aquests motius associats a la naturalesa de la direcció és aconsellable fer la validació sobre les components del vent. No obstant, comentem els resultats que aporten informació valuosa per a la direcció del vent. L'error quadràtic mig està comprès entre 74° i 80°, que és un error no menyspreable, d'uns tres quarts de quadrant d'error en la direcció. La diferència

d'actuació dels dominis amb resolució 9 i 3 km no és destacable, en els períodes de juny i els dos d'agost l'encert en la direcció és lleugerament superior per al domini amb resolució 3 km.

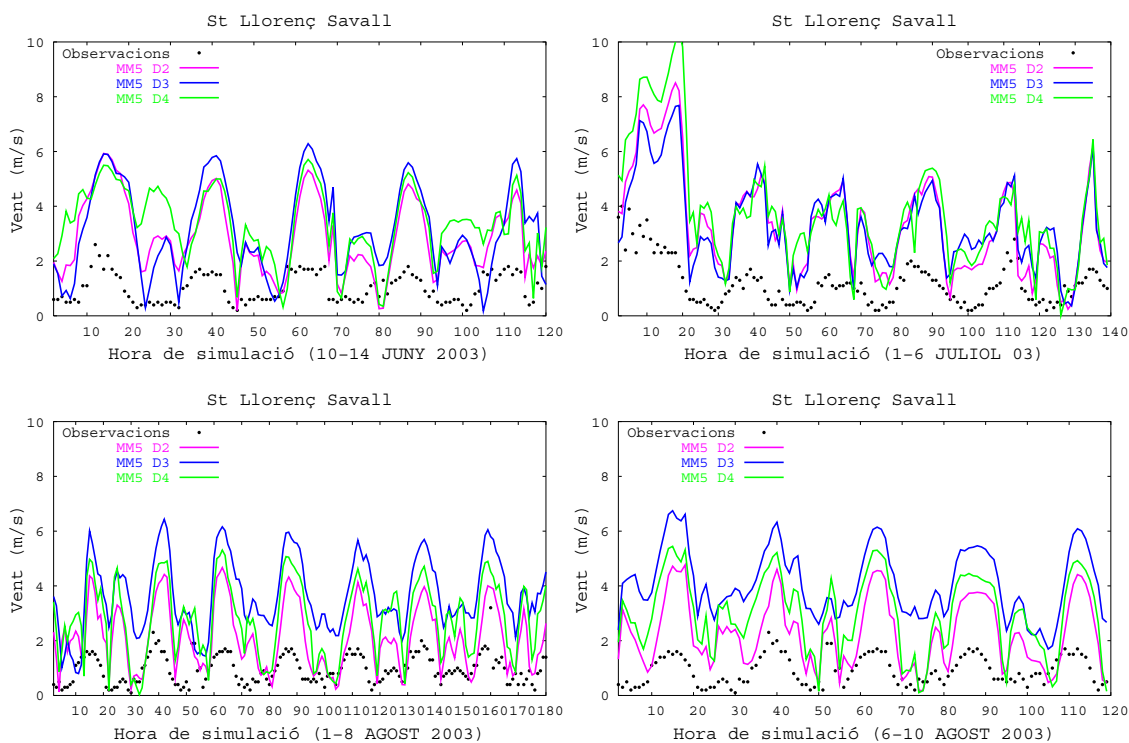


Figura 5.27. Mòdul del vent observat i simulat per a l'estació de St. Llorenç Savall per tots els períodes.

Taula 5.5. Validació per períodes i dominis del model MM5 en la direcció del vent en superfície (a 10 m).

DIR (°)	030610		030701		030801		030806	
	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4
<b>O</b>	187.8	185.2	181.1	182.3	183.7	181.9	182.3	181.5
<b>MM5</b>	197.2	182.2	208.4	203.3	182.4	160.3	173.2	154.4
<b>N</b>	1399	1857	1857	2520	2156	2826	1402	1836
<b>r</b>	0.605	0.671	0.645	0.656	0.677	0.726	0.726	0.743
<b>B<sub>MB</sub></b>	4.7	-1.94	6.9	-0.11	1.4	-4.78	-2.6	-9.5
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	59.4	56.55	59.9	60.8	61.8	58.12	59.4	59.2
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	77.96	74.2	76.4	77.5	79.8	74.98	75.3	74.5
<b>B<sub>MNB</sub></b>	0.726	0.758	0.272	0.214	0.504	0.445	0.435	0.341
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	0.915	0.989	0.485	0.479	0.746	0.743	0.733	0.675

Si ens fixem en l'error per a les components del vent, en comparar l'error normalitzat ens adonem de que és lleugerament superior per la component U que per a la component V. Es pot veure que el valor promig de la component V és major que el de la component U per a tots els períodes, i això es compleix en el valor promig del model a

excepció de la simulació per al període de juliol (on hi havia una situació d'entrada de vents de l'oest) i en el domini petit del darrer període és aproximadament igual a la component U. Aquest predomini de vent del sud és a causa de la brisa marina. L'error quadràtic mig per a la component U està comprès entre 1.8 i 3.2 m/s i per a la component V entre 1.9 i 2.5 m/s. No obstant, l'error normalitzat és superior per a la component U en tots els períodes perquè els valors de U són menors en promig que els de V. A Zhang et al. (2006) s'obtenen valors d'error quadràtic mig de 1.41 i 1.51 m/s per la component U i V respectivament. Però per l'error normalitzat obtenen -1620 i -740 respectivament, aquests resultats tan elevats possiblemen es deuen a que s'han usat tots els valors.

Taula 5.6. Validació per períodes i dominis del model MM5 per la component U del vent en superfície (a 10 m).

U(m/s)	030610		030701		030801		030806	
	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4
<b>O</b>	0.34	0.26	0.61	0.67	-0.088	-0.10	-0.13	-0.12
<b>MM5</b>	0.51	-0.13	1.47	1.37	-0.253	-1.13	-0.67	-1.6
<b>N</b>	1158	1542	1572	2106	1495	1940	1136	1479
<b>r</b>	0.385	0.434	0.573	0.516	0.289	0.258	0.18	0.158
<b>B<sub>MB</sub></b>	0.17	-0.39	0.86	0.69	-0.285	-1.15	-0.54	-1.48
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	1.47	1.71	2.21	2.46	1.48	2.00	1.65	2.29
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	1.83	2.18	2.90	3.22	1.84	2.64	2.09	3.02
<b>B<sub>MNB</sub></b>	0.32	-0.23	0.577	0.496	-0.211	-1.09	-0.47	-1.35
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	1.14	1.40	1.32	1.54	1.16	1.79	1.26	1.93

Taula 5.7 Validació per períodes i dominis del model MM5 per la component V del vent en superfície (a 10m).

V(m/s)	030610		030701		030801		030806	
	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4	D2	D3+D4
<b>O</b>	1.91	1.93	1.46	1.45	1.59	1.62	1.89	1.92
<b>MM5</b>	2.75	2.95	0.94	0.95	1.53	1.62	1.39	1.51
<b>N</b>	1266	1691	1670	2259	1644	2129	1280	1665
<b>r</b>	0.647	0.596	0.555	0.521	0.583	0.537	0.563	0.499
<b>B<sub>MB</sub></b>	0.83	1.02	-0.52	-0.506	-0.063	0.005	-0.50	-0.41
<b>E<sub>MAGE</sub></b>	1.59	1.74	1.77	1.92	1.48	1.63	1.62	1.78
<b>E<sub>RMSE</sub></b>	2.05	2.29	2.28	2.47	1.88	2.07	2.00	2.2
<b>B<sub>MNB</sub></b>	0.752	0.928	-0.118	-0.101	0.205	0.249	-0.071	0.038
<b>E<sub>MNAE</sub></b>	1.11	1.24	1.08	1.21	0.959	1.07	0.999	1.11

Pels valors de la desviació ( $B_{MB}$ ) no es pot concloure que el model tingui una tendència clara a sobreestimar o subestimar una de les dues components, ja que la bias és en general petita en comparació amb l'error mig, i això ens indica que alguns valors van per sobre i d'altres per sota.

La validació del model utilitzant la metodologia convencional, estadística, dona errors no menyspreables per a la direcció del vent i per a la temperatura (Ortega et al., 2009b). Per aquesta última variable, l'error és considerable per temperatures altes, possiblement a causa de la humitat del sòl que en aquestes condicions no és adequada. Una altra font d'error molt important pot ser a causa de la localització de l'estació, que en cap cas és representativa de les dimensions de la malla en què s'està avaluant el model. Convindria realitzar un anàlisi posterior, que queda fora de l'abast d'aquesta tesi, per establir la representativitat de les estacions emprades en la validació.

