Tethys, 3, 63–69, 2006
www.tethys.cat
ISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2006.3.08

Revista editada per **ACAM**
(Associació Catalana de Meteorologia)

Implicant predictors humans en els sistemes numèrics de predicció

Víctor Homar[1] **and David Stensrud**[2]

[1]Grup de Meteorologia. Departament de Física. Universitat de les Illes Balears
[2]National Severe Storms Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. USA

Rebut: 25-VII-2006 – Acceptat: 19-X-2006 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: victor.homar@uib.es

Resum

Els predictors humans milloren rutinàriament les sortides dels models de predicció meteorològica numèrica i sovint tenen coneixements precisos sobre les tendències del model i els seus defectes. Aquesta riquesa de coneixement sobre el rendiment del model està en gran part sense explotar, tanmateix, ja que és utilitzada només al punt final del procés de previsió per a interpretar els camps predits per model. Tot i així, no hi ha raons perquè els predictors humans no puguin intervenir en altres etapes del procés de previsió numèrica del temps, especialment quan s'està utilitzant un sistema de predicció per conjunts. La intervenció humana en la creació de conjunts de simulacions pot ser especialment útil per a la predicció d'esdeveniments poc freqüents, tals com episodis de temps sever, que típicament no són ben predits pels models numèrics. El Spring Program 2003 *del USA/NOAA/SPC/NSSL va avaluar un mètode de generació de prediccions per conjunts on els predictors humans s'implicaren en el procés de creació de conjunts. El predictor encarregat del dia era consultat respecte a les estructures atmosfèriques d'interès i, utilitzant un model adjunt, s'obtenia un conjunt de pertorbacions que s'utilitzaven per generar un sistema de 32 membres. Els resultats mostren que aquest conjunt experimental millora les previsions numèriques operacionals de temps sever. El conjunt generat per humans proporciona millors resultats per a esdeveniments meteorològics d'alt impacte, però li manca dispersió global i produeix previsions poc fiables per als esdeveniments meteorològics no-perillosos. Resultats posteriors obtinguts per a un conjunt construït combinant membres del sistema operatiu amb membres generats pels predictors mostren uns resultats molt prometedors per a la previsió de temps sever mentre eviten el problema de la baixa dispersió global. El valor dels éssers humans en la creació de conjunts dissenyats per a esdeveniments meteorològics específics d'alt impacte és potencialment gran. Tot i així, es requereixen encara esforcos importants de recerca per a analitzar el valor potencial de la intervenció dels predictors en el procés de predicció numèrica del temps. Queda encara molt per aprendre sobre com crear conjunts per a previsions de curt abast de temps sever, i hem de fer un millor ús de l'habilitat i l'experiència dels predictors humans en aquest procés d'aprenentatge.*

1 Introducció

La previsió numèrica dels fenòmens de mesoescala i de temps sever convectiu planteja un dels problemes més desafiants amb els que s'enfronta avui en dia la comunitat atmosfèrica. La física dels models, la resolució i la tècnica d'assimilació de dades estan millorant contínuament i es poden trobar publicacions que mostren simulacions amb resultats molt realistes de sistemes convectius severs. No obstant això, els models encara no proporcionen una guia fiable i consistent per a operacions respecte a aspectes importants del temps sever tals com la iniciació, el mode, la intensitat i l'evolució de la convecció. Es reconeix que les previsions numèriques de mesoescala de curt abast estan deteriorades degut als errors de mostreig d'observació en mesoescala i petita escala, que són desconeguts en gran part, així com

2006 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

també per les deficiències en les fonts dels models com els esquemes de parametrització física. A més, se sap poc sobre els límits de predicibilitat en les escales espacials i temporals de sistemes meteorològics intermitents responsables de produir temps sever. La percepció que múltiples fonts d'incertesa podrien degradar fortament la previsió mina la confiança del predictor en la sortida produïda pels models numèrics de mesoescala, fins i tot quan proporcionen previsions que semblen molt realístiques. Inevitablement, els errors observacionals i les deficiències dels models, així com els assumptes de predicibilitat, introdueixen incerteses inherents que sempre són presents a la previsió.

Les tècniques de predicció per conjunts són un mètode que pot ser utilitzat per incorporar explícitament les incerteses en el sistema numèric de previsió i el seu ús podria ajudar als predictors a l'hora de comprovar els nivells apropiats de confiança en la predicció. Tanmateix, identificar, quantificar i representar aquestes incerteses en el sistema de previsió és una tasca complexa. És ben sabut que combinar les solucions d'un nombre de simulacions numèriques lleugerament diferents no només produeix una previsió millor que cada simulació individual quan s'examinen molts casos (Leith, 1974), sinó que també proporciona una indicació quantitativa d'incertesa de la previsió. La manera com s'han de construir aquestes realitzacions (p.e. membres de conjunt) és avui en dia el focus de molta atenció en la comunitat de recerca meteorològica (Shapiro i Thorpe, 2004).

S'han proposat múltiples mètodes per escollir un conjunt de realitzacions òptim que expliqui els errors d'anàlisi. Per a les previsions de mitjà termini, els majors centres operacionals dels Estats Units i Europa han adoptat dues estratègies ben establertes. Les tècniques de vectors de cultiu (Breeding Toth i Kalnay, 1993) i de vectors singulars (Buizza i Palmer, 1995) han proporcionat millores notables en la competència de les previsions de mitjà termini, fins i tot sense considerar les deficiències de model. Malauradament, tenir en compte els errors a les condicions inicials per a aplicacions a la mesoescala es fa més complex per culpa de l'error d'anàlisi més gran i menys conegut, l'important paper que juguen els esquemes de parametrització dels procéssos físics en les previsions de model de temps "proper", i la gran dependència de l'usuari final de les previsions fiables.

Xu et al. (2001) proposa un mètode per a generar membres per a sistemes de predicció de curt abast que es beneficiï del coneixement dels predictors a l'hora d'identificar les àrees on hi ha probabilitats significatives de temps perillós en la previsió i de les característiques atmosfèriques que poden influenciar el seu desenvolupament. L'enfocament de Xu et al. (2001) assumeix que l'experiència i la competència dels predictors humans és un factor útil per al procés de crear sistemes de predicció per conjunts. És ben sabut que els predictors milloren rutinàriament les prediccions numèriques, com es veu clarament en prediccions de precipitació (Olson et al., 1995, p.e.). A més, els predictors del *USA/NOAA/Storm Prediction Center* identifiquen regularment les regions de mesoescala amb un potencial important de temps sever i confeccionen previsions i avisos de temps sever amb alts nivells de precisió. No hi ha raons per assumir que aquest coneixement i aquesta experiència, encara que siguin subjectius, no poden resultar útils per a la creació de membres d'un sistema de predicció per conjunts i per tant beneficiar el procés de previsió operacional, especialment per a esdeveniments poc freqüents i importants.

Amb l'objectiu de comprovar el valor dels sistemes de predicció per conjunts de curt abast per a la previsió operacional de temps sever, el Storm Prediction Center i el National Severe Storms Laboratory, dos centres USA/NOAA, van dirigir l'experiment del *Spring Programa 2003* (SP03) enfocat principalment en la generació i interpretació de sistemes de predicció mesoescalar per conjunts de curt abast. Animat per les prometedores conclusions de Xu et al. (2001), el SP03 incloïa un subexperiment per tal de comprovar llur mètode per a un nombre més gran de casos que utilitzaven predictors operacionals com a principals conductors del sistema. La idea de base era crear un conjunt diari, adaptat per a proporcionar una guía als predictors sobre les amenaces de temps sever en les 48 hores següents. Essencialment, l'objectiu era generar dispersió en el conjunt en zones específiques i només en camps d'interès específics, com a oposició a la totalitat del territori, o seguint modes de creixement ràpid sota normes genèriques globals. Aquest estudi presenta un resum dels resultats de verificació d'aquest conjunt d'avaluacions realitzades dins el SP03.

2 Generació de conjunt

El sistema de predicció per conjunts generat pel predictor consisteix en 32 membres produïts utilitzant el Model de mesoescala de Cinquena Generació no-hidrostàtic (MM5V3, www.mmm.ucar.edu/mm5/) de la Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research. Aquest conjunt d'avaluacions realitzades dins el SP03 (MM5ADJ) va funcionar els dies feiners des del 28 d'abril al 6 de juny (el SP03 no funcionava els caps de setmana). Per tal de generar les diferents condicions inicials per al conjunt, es va seguir el mètode detallat per Xu et al. (2001): cada dia un predictor humà amb experiència en temps sever havia d'identificar 16 característiques d'interès en la predicció de control que, segons l'opinió del predictor, eren importants per al potencial desenvolupament i/o evolució del temps sever del dia següent (12 UTC a 12 UTC dia 2). El predictor podia seleccionar estructures atmosfèriques a qualsevol hora (en intervals de 6 h) de la previsió de control del model Eta de 48 h. A tall d'exemple, la figura 1a mostra les característiques d'interès destacades pel predictor en el cicle de previsió del 5 de maig de 2003.

Cada dia, i per a cadascuna de les 16 característiques d'interès seleccionades pel predictor, s'inicià una integració de model adjunt (Errico, 1997) i se'n van obtenir les zones sensibles de cada una a les condicions inicials. El model adjunt utilitzat és el *MM5 Adjoint Modelling System* desenvolupat pel National Center for Atmospheric Research. Una

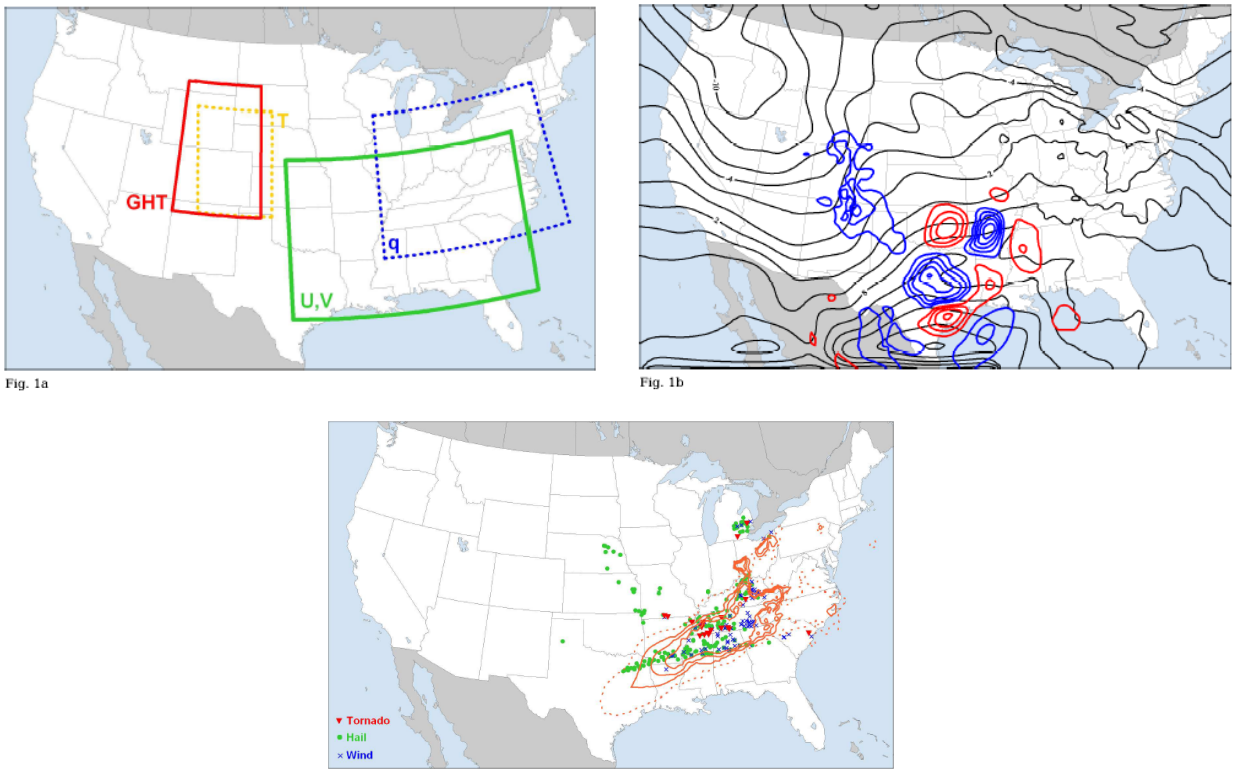

Figura 1. Passos illustratius del procés proposat de generació de prediccions per conjunts: a) Zones i camps seleccionats pel predictors (aquí, altura geopotencial (GHT), temperatura (T), components de vent (U,V) i humitat específica (q)); b) Exemple de pertorbació de temperatura sobre les condicions inicials a 700hPa (els contorns negres representen temperatures no-pertorbades, el vermell i el blau mostren les pertorbacions positives i negatives (o sigui: calentes i fredes)) utilitzat per a generar un únic membre de conjunt i derivat d'un model adjunt aplicat als camps mostrats a a); i c) Registres de tempestes i probabilitat de temps sever (línies taronges en intervals de 25%) com a previsió del sistema de previsió per conjunts de test per al període de 24 h començant a les 12 UTC del 5 de maig. Les línies puntejades representen el 5% de les probabilitats.

vegada obtinguts els camps de sensibilitat, es reescalaren els components de vent horitzontal i la temperatura a una amplitud màxima de 8.0 m s^{-1} i 4.0 K, respectivament. Finalment, es llancaren dues simulacions de MM5 per a cada característica destacada, cadascuna d'elles utilitzant pertorbacions en les dues direccions (positiva i negativa). La figura 1b mostra un exemple d'aquestes pertorbacions per al camp de temperatura a 700 hPa. Com que es va demanar al predictor que seleccionés 16 característiques cada dia, es van produir 32 membres per a formar el conjunt MM5ADJ.

Encara que el model adjunt sigui tangent lineal, i per tant les pertorbacions foren definides estrictament per canviar la característica seleccionada pel predictor en sentit lineal, l'evolució no-lineal de la pertorbació pot ser interpretada com una pertorbació estocàstica per a la trajectòria en l'espai de fases del model inicial. Tanmateix, aquest component estocàstic de la pertorbació quedarà confinat molt probablement a la zona d'interès en la previsió i hora seleccionades pel predictor. Essencialment, utilitzant les pertorbacions positives i negatives, la característica d'interès s'amplia i es redueix igualment en sentit lineal. L'evolució no lineal de les pertorbacions positives i negatives, tanmateix, podrien produir resultats inesperats ja que la característica d'interès especificada no s'amplia ni es redueix simètricament en les dues previsions no-lineals. Aquest comportament no-lineal es veu com una aportació positiva al sistema, assegurant una diversitat rica de solucions entre els membres del sistema de predicció per conjunts sobre les regions importants definides pel predictor, en oposició als efectes trivials de l'evolució purament lineal de les pertorbacions derivades linealment.

3 Conjunts de dades de verificació

L'avaluació del MM5ADJ es basà en observacions de temps sever sobre els Estats Units continentals (CONUS), a l'est de les Rocalloses. El conjunt de dades observacionals utilitzades per a la verificació són els registres de temps sever del SPC. Aquesta base de dades conté un llistat dels informes de danys de tornados, calamarsa gran (més de 20 mm) i vent convectiu (més fort de 50 nusos) dels Estats Units amb informació sobre la intensitat de l'esdeveniment i la seva localit-

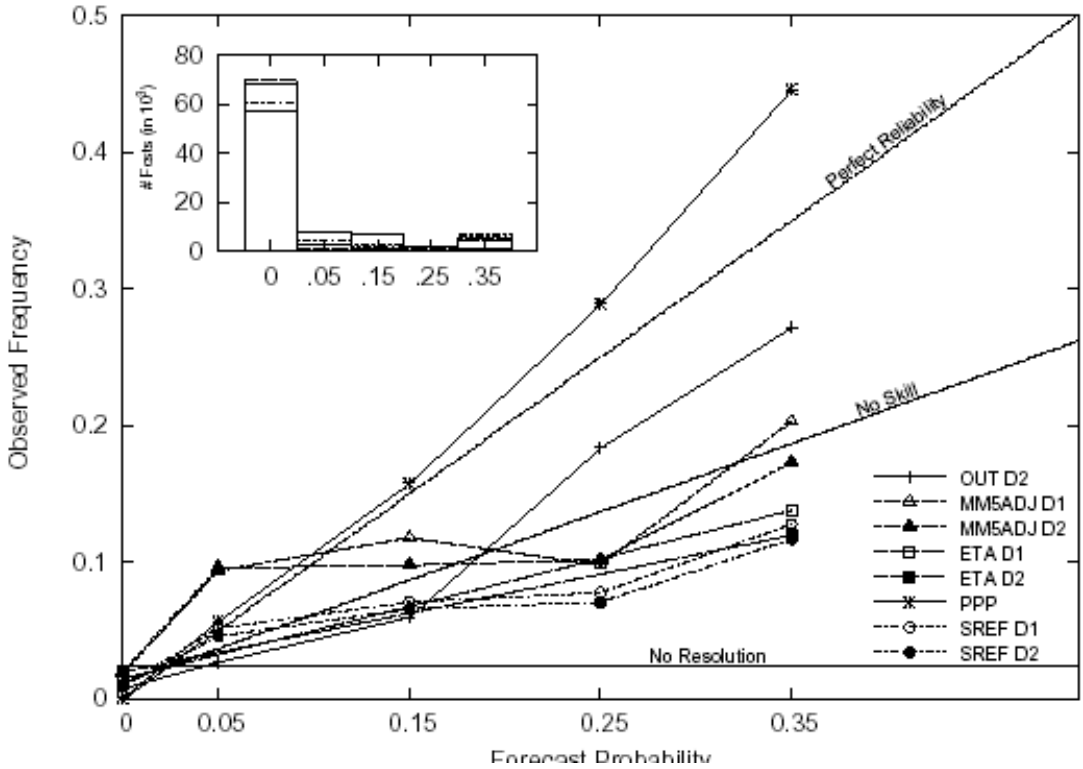

Figura 2. Diagrames d'atributs per a la probabilitat de temps sever obtinguts a: previsions preliminars del Dia 2 del SP03, T+24 i T+48 h MM5ADJ, Eta i SREF.

zació en l'espai i el temps. La figura 1c mostra un exemple dels registres a la base de dades del SPC.

A més de la verificació objectiva amb el conjunt de dades observacionals, el valor relatiu del MM5ADJ es comprova comparant-lo amb les previsions operacionals de curt abast disponibles per al mateix període:

- Previsions subjectives per al Dia 2: El predictor del SP03 emetia diariament una previsió experimental de temps sever per al Dia 2, seguint les mateixes pautes utilitzades per a les previsions rutinàries operacionals del SPC. Com que les previsions del SPC s'emeten utilitzant cinc categories discretes de probabilitat: 0.00, 0.05, 0.15, 0.25 i 0.35, i per tal de garantir una comparació justa entre les prediccions considerades, totes les previsions considerades en aquest estudi estan divides en aquestes categories.
- Eta operacional: Els resultats diaris del model operacional Eta de les 12 UTC s'inclou per tal d'afegir una referència d'un model determinista a la comparació.
- Sistema NCEP SREF: El sistema de predicció per conjunts del NCEP per a previsions de curt abast estava format per 10 membres durant la SP03, cinc Eta i cinc membres del Model Espectral Regional (RSM). Malauradament, degut a problemes amb l'arxiu de les dades, només es disposa de 11 dies per a fer la comparació durant el període que va durar la SP03. Tots els resultats obtinguts d'aquesta petita mostra d'11 dies es completa amb un test de significancia estadística.
- Pronòstic pràcticament perfecte: Brooks et al. (2003) discuteixen el concepte dels pronòstics pràcticament perfectes (PPP) i presenten les característiques principals. Aquesta previsió hipotètica és tan precisa com es podria esperar d'un predictor ja assabentat dels registres de temps sever, donades les limitacions de la previsió del món real.

4 Verificació de previsions de temps sever

A diferència de les prediccions confeccionades per predictors humans, els models actuals no preveuen explícitament el temps sever. El diagnòstic de temps sever a partir d'anàlisis o models que no resolen explícitament la convecció pot ser deduït, almenys en part, a través d'indicis que caracteritzen l'ambient favorable i poden permetre algunes discriminacions bàsiques respecte al tipus o de la intensitat dels fenòmens convectius. En aquest estudi, es considera que un model preveu temps sever quan en una caixa de la quadrícula ambdós el *Supercell Composite Parameter* (Thompson et al., 2002, SCP) > 1 i l'activació de l'esquema convectiu del model tenen lloc simultàniament. Juntes, aquestes dues quantitats especifiquen regions on el

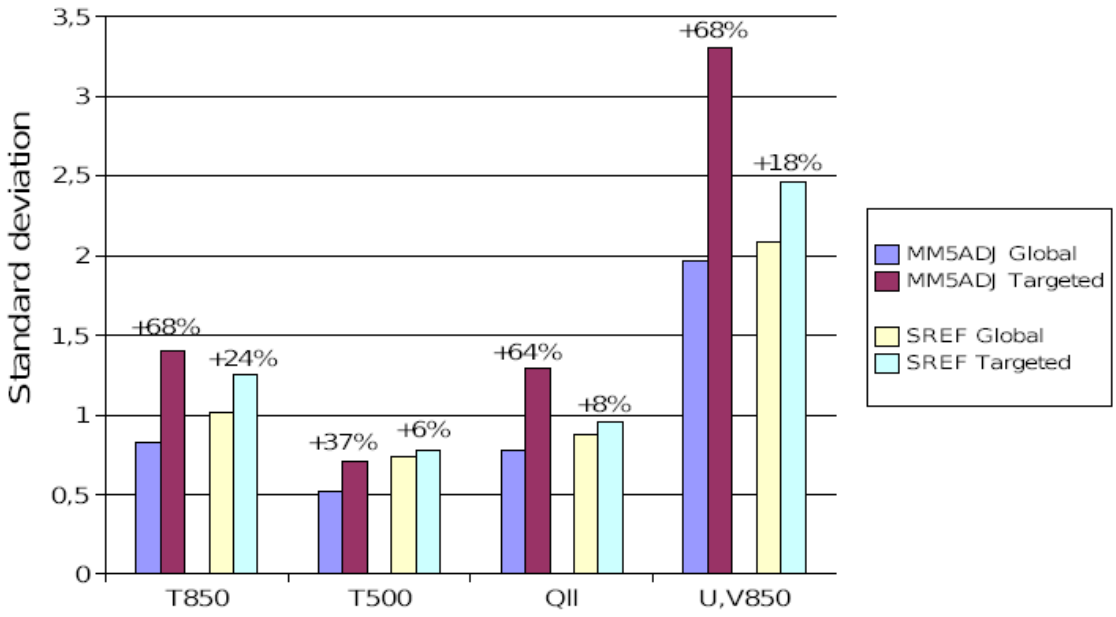

Figura 3. Mitjana de la desviació estàndard de la previsió de 36 h, calculada als llocs de sondeig. Els valors globals estan calculats de mitjana al CONUS est de les Rocalloses, i els Estudiats només inclouen zones delineades pel predictor quan defineix les pertorbacions. Els valors per sobre de les barres indiquen el canvi de percentatge de la verificació global a la volguda. Qll es refereix a la mitjana de la desviació estàndard de Q a 1000, 850 i 700 hPa.

model prediu conjuntament un ambient favorable a les tempestes supercel·lulars, i on es desenvolupa la convecció.

Per tant, la probabilitat que hi hagi temps sever durant un període de 24 h en cada punt de quadrícula es defineix senzillament com el nombre de membres del conjunt que tenen un SCP superior a 1 i precipitació simultània convectiva en aquell punt de quadrícula en qualsevol moment durant aquell període de 24 h, dividit pel nombre total de membres del conjunt. La figura 1c mostra un exemple d'aquest camp de probabilitat del MM5ADJ.

La verificació de les previsions probabilístiques per a tots els casos es fa utilitzant el diagrama d'atributs. Aquest diagrama mostra la freqüència observada d'un esdeveniment com una funció de la categoria de previsió i permet una interpretació per a cada categoria de previsió separadament. La figura 2 mostra el diagrama d'atributs per a totes les previsions comparades en aquest estudi. La freqüència climatològica de la mostra és 0.016 registres d'events severs per punt de quadrícula durant 24 h. Com era d'esperar per a la previsió d'esdeveniments improbables, totes les previsions de la comparació mostren una bona capacitat en predir l'absència d'esdeveniments severs (0.00 probabilitats), amb les previsions humanes mostrant la més alta fiabilitat en aquesta categoria. Per a les probabilitats baixes (0.05) i moderades (0.15), el MM5ADJ i el SREF són les úniques previsions que mostren una certa competència, amb una fiabilitat especial bona per al SREF en les prediccions de baixa probabilitat.

Per a les probabilitats més altes (quan una majoria dels membres del conjunt està d'acord), el MM5ADJ és l'únic model que mostra una mica de competència en la categoria de probabilitat de 0.35 i encara existeix alguna resolució entre les previsions de 0.25 i 0.35. Tanmateix, les previsions humanes mostren competència en les categories d'alta probabilitat, revelant l'habilitat dels predictors quan mostren molta seguretat en la intensitat de la situació del dia i decideixen utilitzar les probabilitats altes en les previsions. En canvi, les previsions del model Eta són clarament inferiors en aquest tipus de verificació de probabilitat, mostrant una clara sobreprevisió de temps sever. Encara que els resultats del SREF mostren una fiabilitat gairebé perfecta per a la categoria baixa, no té competència per a les categories de probabilitat més alta. La significància estadística de les diferències entre els resultats del MM5ADJ i del SREF ha estat avaluada utilitzant un test no-paramètric de *bootstrap* amb 10000 mostres. La majoria de les diferències entre el MM5ADJ i el SREF visibles a la figura 2 són importants en un nivell de confianç del 99%.

Aquest resultat mostra amb claredat l'avantatge del MM5ADJ sobre el SREF a l'hora de predir probabilitats de temps sever a partir de 0.15, normalment associat amb els episodis més intensos i perjudicials. Això és molt probablement conseqüència del disseny adaptat del MM5ADJ per centrar-se en les zones d'amenaça de temps sever, mentre que el sistema SREF està dissenyat per cobrir una àmplia gamma d'aspectes de previsió de mesoescala i mostra la seva força en la part de l'espectre d'episodis severs de baixa probabilitat.

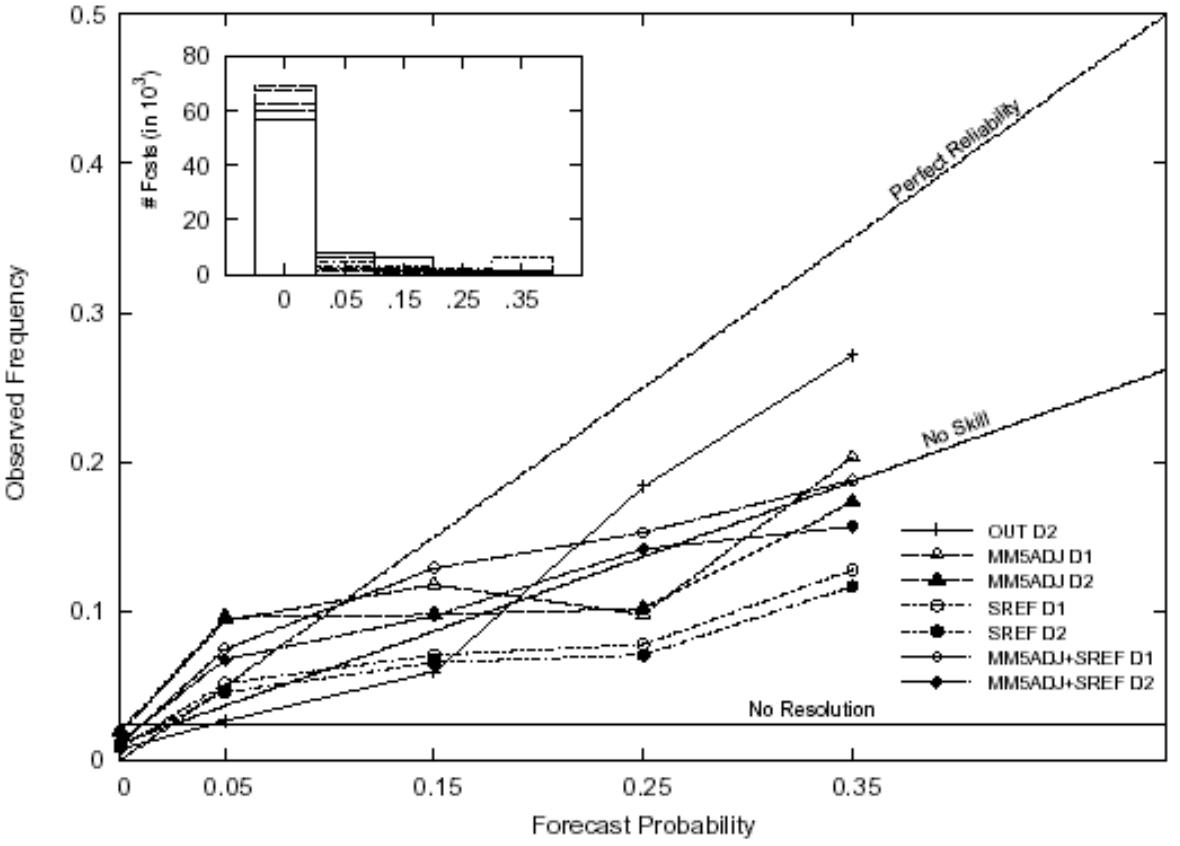

Figura 4. Com en la Fig. 2 però per al sistema de 42 ENS.

4.1 Dispersió dirigida

Per entendre millor les diferències entre els sistemes MM5ADJ i SREF a l'hora de predir episodis d'alta probabilitat (0.25) de temps sever, analitzem la capacitat del MM5ADJ per generar dispersió especialment sobre les zones en qüestió definides pel predictor. Es calculen dues versions de la dispersió per a cada model (figura 3): la dispersió Global és la mitjana de la dispersió calculada a cada lloc de sondeig dins del CONUS, a l'est de les Muntanyes Rocalloses; la dispersió estudiada es calcula tenint en consideració només la previsió dels llocs de sondeig a dins de les zones en qüestió i els temps designats pel predictor quan construeix el conjunt. L'augment relatiu de dispersió de la global a l'estudiada és molt més gran al MM5ADJ que al SREF, especialment en els nivells baixos on s'obtenen augments de dispersió del 65 al 70%. Per tant, la tècnica dels vectors de *breeding* (així com la diversitat de model) en el sistema SREF produeix una gran dispersió en un sentit global, mentre que el sistema adaptat MM5ADJ apunta amb èxit a la dispersió de conjunt espacial i temporalment per sobre de la regió seleccionada inicialment pel predictor.

5 Test del conjunt mixt

Per tal de comprovar l'efecte d'afegir membres al sistema MM5ADJ que proporcionen dispersió al llarg de tot el domini, avaluem les prediccions d'un conjunt generat combinant els 32 membres del MM5ADJ i els 10 del SREF per produir un conjunt de 42 membres (42 ENS). Aquest conjunt no només es beneficiarà d'un gran nombre de membres sinó també de ser multimodel i d'incloure dues tècniques de pertorbació de condicions inicials. Aquest conjunt encara està centrat principalment en el temps sever però també es podria beneficiar del millors resultats a nivell global dels 10 membres del SREF.

Les previsions de temps sever per a aquest sistema es generen per als 42 ENS seguint el mateix mètode presentat a la secció anterior. El test no-paramètric de *bootstrap* també s'utilitza per comprovar la significància estadística de les diferències entre els resultats dels 42 ENS i els del MM5ADJ. La corba del diagrama d'atributs per a les previsions dels 42 ENS mostra una competència superior d'aquesta configuració comparada amb el MM5ADJ per a gairebé tots els intèrvals de probabilitat (Fig. 4). Només per a les categories del 15 i del 30%, els 42 ENS no aporten re-

sultats significativament millors que el MM5ADJ tant per al Dia 1 com pel 2.

6 Conclusions

El *Spring Program 2003* del SPC/NSSL incloïa un conjunt experimental enfocat a comprovar per un període de temps extens el mètode de generació de prediccions per conjunts de Xu et al. (2001) proposat, utilitzant predictors humans per a identificar característiques atmosfèriques que ells creien importants per al desenvolupament i l'evolució del temps sever durant el període de previsió de 24-48 h. Utilitzant un model adjunt, s'identifiquen i s'utilitzen pertorbacions de les condicions inicials del model de previsió que influenciarien aquestes característiques atmosfèriques seleccionades pel predictor per tal de crear un conjunt de previsions de model. El rendiment d'aquest conjunt experimental s'avalua utilitzant registres de temps sever.

L'experiment va ser dissenyat per a funcionar a temps real, amb l'esperança inicial que els predictors tindrien temps d'examinar i comprovar les previsions de conjunt i guanyar experiència en la selecció dels camps de pertorbació, els nivells verticals, i les zones. Malauradament, les limitacions dels ordinadors no van permetre que es donés aquesta experiència d'aprenentatge ja que les previsions eren disponibles a una hora massa tardana del dia. Així, als predictors només se'ls van donar consells bàsics sobre com generar les pertorbacions. Hi ha molts altres aspectes de l'experiment que són imperfectes i s'haurien de millorar en noves edicions futures d'experiments similars. Tot i així, els resultats inicials són suggerents i garanteixen consideracions curioses.

Els resultats de les verificacions mostren el valor de les previsions experimentals del sistema per conjunts MM5ADJ comparades amb el sistema operacional SREF, malgrat les múltiples millores encara possibles per al sistema experimental. En l'experiment s'utilitza només un model, essent les pertorbacions seleccionades pels humans l'única font de dispersió en el sistema. Encara que es proporcionés una formació bàsica al principi de cada setmana experimental del SP03 cobrint una selecció de camps, nivells, mides, i temps de les estructures estudiades, no es van donar normes definitives als predictors sobre la construcció de les pertorbacions, perquè abans això no havia estat mai dirigit com un experiment de temps real. A més, els predictors no tenien experiència prèvia amb aquest tipus de creació de conjunts i no se'ls va proporcionar realimentació quantitativa durant l'experiment. Recerques posteriors podrien indicar si certes mides, certs camps i nivells són més adients per a definir les pertorbacions per a uns tipus específics de temps pronosticat.

Malgrat la manca de coneixement i experiència previs utilitzant aquesta tècnica, el conjunt experimental mostra una millora en les previsions numèriques de temps sever, argumentable perquè el sistema és capaç de generar satisfactòriament dispersió sobre les àrees escollides pel predictor. Tanmateix, les previsions de baixa probabilitat de temps sever obtingudes del sistema experimental són menys precises que les del SREF i de l'Eta operacional. Una conclusió clara d'aquests resultats és que a aquest conjunt, adaptat per centrar-se exclusivament en temps perillós i d'alta intensitat, li manca dispersió global i aporta previsions no fiables per als esdeveniments de temps no-perillós. Els resultats d'un conjunt construït combinant membres globalment pertorbats (del SREF) i membres humanament pertorbats (del MM5ADJ) mostren una capacitat de predicció prometedora per a les previsions de temps sever. Mentre que el muntatge experimental no va ser perfecte, els resultats indiquen que el valor dels éssers humans en la creació de conjunts dissenyats per centrar-se en temps sever específicament és potencialment gran.

Es recomana vigorosament més recerca del valor potencial de la intervenció de l'ésser humà com a part del procés de creació del conjunt de prediccions, fins i tot si el resultat final és aprendre com els predictors poden proporcionar input de temps real en un sistema de generació de conjunts automatitzat. Encara hem d'aprendre molt sobre com crear sistemes de predicció per conjunts per a previsions de curt abast de temps d'alt impacte, i hem de fer més bon ús de les habilitats i l'experiència dels predictors humans en aquest procés d'aprenentatge.

Referències

Brooks, H., Doswell-III, C. A., i Kay, M. P., 2003: *Climatological estimates of local daily tornado probability for the united states*, Weather Forecast., **18**, 626.640.

Buizza, R. i Palmer, T. N., 1995: *The singular vector structure of the atmospheric general circulation*, J. Atmos. Sci., **52**, 1434–1456.

Errico, R. M., 1997: *What is an adjoint model?*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., **78**, 2577–2591.

Leith, C. E., 1974: *Theoretical skill of monte carlo forecasts*, Mon. Weather Rev., **102**, 401–418.

Olson, D. A., Junker, N. W., i Korty, B., 1995: *Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC*, Weather Forecast., **10**, 498–511.

Shapiro, M. A. i Thorpe, A. J., 2004: *Thorpex international science plan*, Tech. rep. World Meteorological Organization, **Version 3**.

Thompson, R. L., Edwards, R., i Hart, J. A., 2002: *Evaluation and interpretation of the supercell composite and significant tornado parameters at the storm rediction center*, 21st Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., San Antonio, TX, USA, pp. J11–J14.

Toth, Z. i Kalnay, E., 1993: *Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., **74**, 2317–2330.

Xu, M., Stensrud, D. J., Bao, J.-W., i Warner, T. T., 2001: *Applications of the adjoint technique to short-range ensemble forecasting of mesoscale convective systems*, Mon. Weather Rev., **129**, 1395–1418.