

Sviluppo e ottimizzazione di un modello fisico–matematico ad area limitata e ad alta risoluzione per la previsione di dati meteorologici

Giuseppe Castorina^(a), Maria Teresa Caccamo^(a), Franco Colombo^(a), Vincenzo Insinga^(b), Emanuele Maiorana^(b), Salvatore Magazù^(a)

^(a) Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e della Terra, Viale F.S. D'Alcontres, 31, 98166, Messina. gcastorina@unime.it, mcaccamo@unime.it, fcolumbo@unime.it, smagazu@unime.it

^(b) Consorzio Interuniversitario Scienze Fisiche Applicate (CISFA), Viale F.S. D'Alcontres, 31, 98166, Messina. v.insinga@alice.it, emaiorana16@gmail.com

Riassunto

Nel presente contributo vengono esposti gli esiti più rilevanti di uno studio volto allo sviluppo e all'ottimizzazione di un modello fisico – matematico ad area limitata e ad alta risoluzione finalizzato alla previsione numerica di dati meteorologici, con specifico riferimento alla regione Sicilia.

Il modello adottato per questo scopo è del tipo Advanced Research WRF (ARW), originariamente sviluppato presso i laboratori del National Center for Atmospheric Research (NCAR) nella versione 3.7.1.

Il suddetto modello è stato sviluppato e adattato al territorio siciliano mediante l'incremento della risoluzione dei dati geografici statici iniziali (DEM) e l'ottimizzazione dei parametri locali di uso del suolo e di copertura vegetativa.

Per testare la validità dell'approccio adottato sono stati realizzati run di "re-analysis" utilizzando diversi case-studies, tra cui l'evento alluvionale estremo che ha interessato, tra gli altri, il comune di Barcellona Pozzo di Gotto (Messina) nella mattinata del 10 ottobre 2015.

Abstract

In this paper the most relevant results of a study addressed to the development and optimization of a limited area and high-resolution physical-mathematical model aimed to the numerical prediction of meteorological data, with specific reference to Sicily, are reported.

The model adopted for this purpose is the Advanced Research WRF (ARW), originally developed at the laboratories of the National Center for Atmospheric Research (NCAR) in version 3.7.1.

Such a model has been developed and adapted to the Sicilian territory through the increase of the resolution of the initial static geographical data (DEM) and the optimization of local parameters for the land use and for the vegetative cover.

In order to test the validity of the adopted approach "re-analysis" runs using different case studies have been performed, in particular the extreme flood event that affected Barcellona Pozzo di Gotto (Messina) on the morning of October 10th, 2015.

Definizione di modello e delle principali equazioni costituenti (equazioni primitive)

Da un punto di vista generale, un modello meteorologico altro non è, che una rappresentazione schematica e semplificata della realtà fisica, descritta attraverso un insieme di equazioni che simulano il comportamento dell'atmosfera. Un particolare software utilizza dei dati di ingresso (input), esegue un run impiegando algoritmi basati su un set di equazioni accoppiate, ed esprime il risultato output (uscita) sotto forma di un nuovo insieme di dati. Nel caso della previsione meteorologica gli algoritmi di calcolo sono costituiti dall'insieme di equazioni differenziali alle derivate parziali, che descrivono la dinamica dell'atmosfera. Il nucleo principale di un codice di calcolo volto alla soluzione di tale sistema di equazioni differenziali è normalmente formulato in linguaggio FORTRAN. Subroutine specifiche, come ad esempio quelle relative al trattamento di

matrici, a funzioni matematiche standard e a sezioni grafiche possono utilizzare altri linguaggi, usualmente il C.

Come dati di input del modello, si impiegano usualmente i valori di: pressione al suolo, velocità del vento nelle sue componenti spaziali, temperatura e umidità dell'aria a diverse quote dell'atmosfera (fino a circa 20÷50 km di altezza). Queste variabili, denominate variabili prognostiche A_p , sono presenti nel modello sotto forma di derivate rispetto al tempo.

Queste variabili rivestono un ruolo chiave in seno al modello in quanto coincidono con le variabili oggetto delle osservazioni e perché nel procedere del calcolo permettono di ricavare anche tutte le altre variabili che da esse dipendono, dette diagnostiche. L'obiettivo di una previsione è quello di restituire, dopo il calcolo, il valore mutato delle variabili summenzionate (i.e. velocità del vento, temperatura, pressione, umidità a varie altezze dal suolo). Da queste si possono poi ricavare tutte le altre grandezze dipendenti: precipitazione, nuvolosità, ecc...

Le equazioni principali, dette primitive, che sono utilizzate dai modelli sono:

- Equazioni di Navier-Stokes (NS) per la definizione delle componenti del campo di vento (anche dette equazioni di bilancio della quantità di moto in un fluido);
- Primo Principio della termodinamica (principio di conservazione dell'energia);
- Equazione di evoluzione del vapore acqueo (tiene conto di tutti i processi che compongono il ciclo dell'acqua e dei suoi passaggi di stato, cioè evaporazione, condensazione, fusione, solidificazione e sublimazione);
- Equazione di continuità (legge di conservazione della massa).

A queste equazioni si aggiungono:

- Equazione di stato dei gas, che lega pressione, densità, temperatura e volume di una massa d'aria;
- Equazione idrostatica, che riguarda la relazione approssimata tra la variazione di pressione con la quota e la densità dell'aria.

Modelli globali e modelli ad area limitata

Esistono due tipi di modelli meteorologici: i Modelli Globali (GM = Global Model) e i modelli ad Area Limitata (LAM = Limited Area Model). E' intuitivo che i modelli globali prendono in considerazione tutta l'atmosfera terrestre, mentre quelli ad area limitata lavorano su volumi più ristretti. Poiché non esistono soluzioni analitiche semplici del sistema di equazioni valide per tutti i punti dell'atmosfera, è necessario ricorrere a una partizione della porzione di atmosfera di interesse, in una matrice tridimensionale individuata da punti di griglia, riformulando così il problema in termini discreti, una volta definite le condizioni al contorno. La semplificazione adottata, che prende il nome di discretizzazione, comporta che alle derivate si sostituiscano delle differenze finite.

Questa sostituzione rende il sistema di equazioni differenziali originario affrontabile mediante calcolo numerico. Tale approccio comporta la definizione di una serie di punti fissi, selezionati nel dominio di definizione delle variabili delle equazioni. Ogni variabile viene quindi completamente identificata dai valori assunti su questi punti, i cosiddetti punti di griglia, mentre le derivate spaziali diventano differenze finite valutate tra i punti di griglia. Si noti che ad ogni punto griglia è associata una porzione di atmosfera, le cui caratteristiche sono rappresentate dai valori assunti dalle variabili. La previsione diventa pertanto un procedimento per il calcolo dei valori futuri delle variabili meteorologiche su tutti i punti di griglia. Nel caso specifico si immagina di sezionare completamente l'atmosfera sia in orizzontale sia in verticale mediante una griglia tridimensionale di scala opportuna. Non ci sono vincoli sul numero complessivo di punti (chiamati anche nodi) da usare, anche se è evidente che infittendo la griglia l'intervallo di separazione tra i punti diminuisce e da ciò risulta una miglior precisione del computo numerico. In pratica è la potenza di calcolo dello strumento elettronico che limita la scelta dei punti: o si considera tutto il globo e quindi si tiene ampia la distanza tra i nodi, oppure ci si concentra su un'area infittendo il passo di griglia,

guadagnando così in risoluzione (Kain, 2004). Poiché le capacità di calcolo automatico sono finite, i Modelli Globali, avendo il passo di griglia più grande, introducono le più importanti semplificazioni, operando con risoluzioni comprese tra i 10 e i 50 km in orizzontale.

I LAM, Local Area Model, riducendo la zona di interesse, impiegano una griglia più fitta, con passo tipico di 1÷10 km. In verticale, la porzione di atmosfera considerata si può estendere fino ad un'altezza di 30÷70 km, distribuiti su circa cinquanta livelli, in modo non uniforme (più fitti vicino al suolo, dove è necessaria una migliore definizione verticale). È importante sottolineare che i Modelli Globali servono ad inizializzare i LAM, ossia, all'istante iniziale $t=0$ relativo all'inizio dei calcoli, i LAM utilizzano le uscite GM come valori iniziali e successivamente elaborano una previsione.

Inoltre i GM forniscono ai LAM le condizioni al contorno laterali durante tutto il tempo di previsione. Ovviamente ci saranno delle lacune, perché le condizioni iniziali e al contorno su tutti i punti della maglia più fitta non sono note; sarà necessario quindi interpolare questi dati con tecniche opportune. Pur soffrendo di queste incertezze i LAM permettono di produrre previsioni molto dettagliate, ma valide solo da poche ore fino a circa due giorni (Janjic, 2002).

Il modello WRF

Il modello Weather Research Forecast (WRF) è un sistema di previsione numerica di nuova generazione progettata per le esigenze di ricerca e di previsione operativa dei fenomeni atmosferici. Il WRF è frutto della collaborazione tra il National Center for Atmospheric Research (NCAR), i National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e l'Earth System Research Laboratory (ESRL) della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). WRF è stato progettato sia per scopi scientifici (ad esempio per la simulazione numerica delle dinamiche atmosferiche), sia per scopi più operativi, come la previsione numerica operativa (De Meiji et al. 2014).

La struttura del modello è costituita da un nucleo centrale, chiamato WRF Software Framework (WSF), che si compone di diversi schemi di assimilazione e parametrizzazione delle variabili fisico-chimiche, al quale sono connessi i moduli di pre e post processing.

La fase di pre-processing (WPS) include 3 routine di calcolo, Geogrid, Ungrib e Metgrid che in sequenza si occupano di elaborare i dati che vanno ad alimentare il modello. Geogrid crea i dati statici che includono i dati geografici e i dati di uso del suolo; Ungrib assimila i dati meteorologici in formato GRIB raccolti dai centri di calcolo mondiali, mentre Metgrid interpola i dati meteorologici orizzontali, scalandoli sul dominio definito in origine.

I dati così pre-elaborati, vengono passati ad altre routine di calcolo, e nello specifico al software WRF-REAL che interpola verticalmente i dati nelle coordinate spaziali del modello (Pineda 2004).

La fase finale del processo è costituita dalla produzione dei dati di output originata dal software WRF e dalla successiva produzione grafica (post-processing).

I “core” che governano la dinamica del modello WRF sono due:

- l'Advanced Research WRF (ARW), codice di calcolo sviluppato da NCAR, in grado di simulare diverse tipologie di eventi meteorologici con diverse risoluzioni spaziali;
- il Non-hydrostatic Mesoscale Model (NMM), realizzato da NCEP, in grado di operare in modalità sia idrostatica che non-idrostatica.

Il “core” ARW è dedicato in genere ad applicazioni di ricerca, mentre il secondo ha uno scopo più operativo. Tuttavia per modelli ad area locale, laddove siano disponibili risorse di calcolo sufficienti, i risultati di ARW sono migliori di NMM.

Il modello WRF risulta essere molto versatile e permette l'utilizzo di diverse tipologie di parametrizzazione per quanto riguarda, ad esempio, la microfisica delle nubi, la convezione, i flussi all'interno del Planetary Boundary Layer, i processi radiativi e di diffusione.

Il WRF è open-source: questo significa che volendo è possibile modificare i codici (equazioni comprese). Esso è anche altamente configurabile: tramite opportuni files (detti namelist) si possono scegliere le impostazioni da dare ai molti parametri dinamici e fisici presenti nel codice. E' possibile ad esempio scegliere uno tra i diversi algoritmi di calcolo presenti per stimare le

precipitazioni: quello esplicito, dove il modello calcola direttamente nubi e precipitazioni e che va bene solo per altissime risoluzioni e quello parametrico da preferire per risoluzioni superiori ai 2-3 km (Cassola 2015).

WRF ha oggi una enorme comunità di utenti e sviluppatori registrati (circa 30.000 in oltre 150 paesi). Il sito ufficiale del WRF fornisce informazioni generali sull'organizzazione del centro, sugli sviluppi in itinere e sulle applicazioni in tempo reale.

Un modello ad area locale per la Sicilia: il WRF UniMe

Il gruppo di ricerca in Fisica Ambientale, con specifico riferimento alle tematiche applicative nei settori della Meteorologia e Modellistica Ambientale, dal marzo 2016 ha reso operativo per scopi di ricerca il modello fisico-matematico ad area limitata WRF (Weather Research and Forecasting model). Attualmente viene utilizzato il core ARW alla versione 3.7.1.

La configurazione dei modelli, frutto dell'esperienza pluriennale nel campo delle previsioni meteorologiche acquisita da alcuni dei componenti del gruppo, è specificamente ottimizzata per il territorio siciliano. I miglioramenti apportati riguardano l'aumento della risoluzione dei dati geografici statici iniziali (dati DEM 20x20 m), l'ottimizzazione dei parametri locali di uso del suolo e copertura vegetativa (dati CORINE), l'acquisizione dei dati delle temperature del mare in modalità dinamica e sono oggetto di una costante attività di ricerca e sviluppo (Thompson 2004). In figura 1 viene presentato un confronto fra dati orografici del modello WRF e quelli ad alta risoluzione del modello WRF-UniMe.

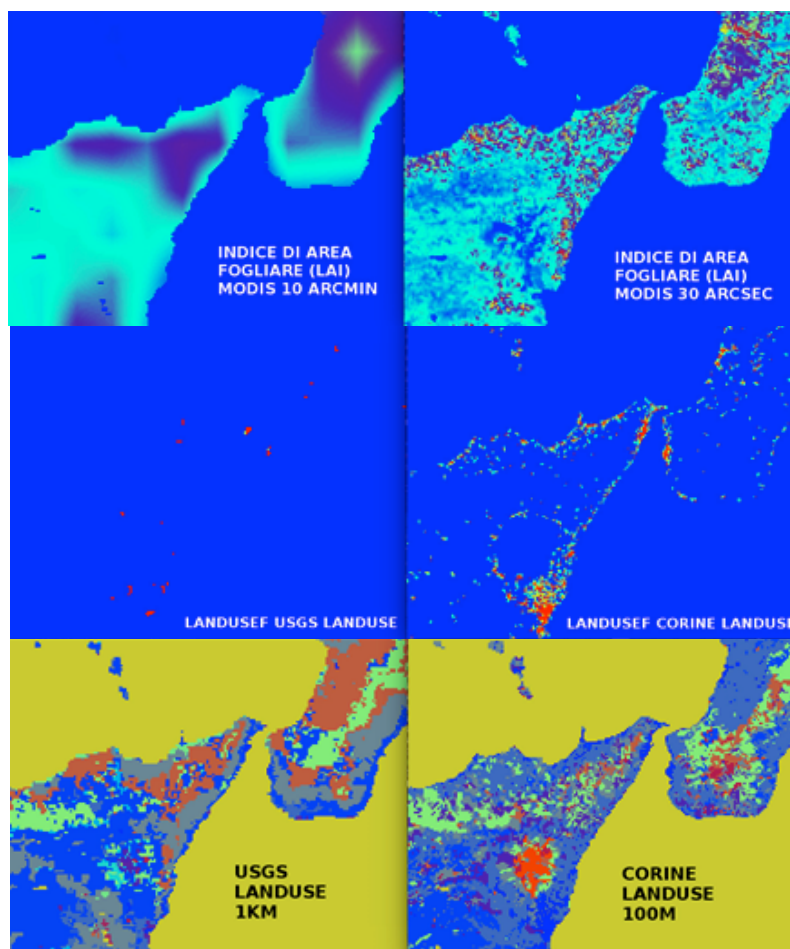


Figura 1 - Confronto fra dati orografici del modello WRF e quelli ad alta risoluzione del modello WRF-UniMe.

Gli interventi sulle parametrizzazioni fisiche del modello riguardano la configurazione dei 7 schemi di seguito elencati in tabella 1.

cu_physics	cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta)
mp_physics	microphysics	Ferrier
ra_lw_physics	long wave radiation	GFDL long wave radiation scheme
ra_sw_physics	short wave radiation	GFDL short wave radiation scheme
bl_sfclay_physics	surface layer	Schema di superficie Janjic
bl_surface_physics	land-surface layer	
bl_pbl_physics	boundary layer	Mellor-Yamada-Janjic TKE

Tabella 1 – Parametrizzazioni fisiche del modello WRF-UniMe.

Il modello WRF-UNIME gira a diverse risoluzioni e con più run giornaliere che permettono di produrre previsioni operative ad altissima risoluzione sino a 3 km di dettaglio spaziale. In tabella 2 si riassumono le caratteristiche dei vari run operative presso il CED dell'Università di Messina:

RUN	Risoluzione spaziale	durata	Risoluzione temporale	Inizializzazione	Corse giornaliere	Plottaggio dati local time
ARW 10km	10 km	144 h	1 h	GFS 0.25 °	4 (00,06, 12, 18z)	07:00, 13:00, 19:00, 01:00
ARW 5km	5 km	72 h	1 h	GFS 0.25 °	4 (00, 06,12,18z)	08:00, 14:00, 20:00, 02:00
ARW 3km	3 km	48 h	1 h	GFS 0.25 °	2 (00,12z)	09:00, 21:00

Tabella 2 – Caratteristiche parametriche del modello WRF-UniMe.

Inoltre, in via sperimentale, viene fatto girare il modello con risoluzione spaziale di 1km, su spot specifici di particolare interesse.

Vengono prodotte tutte le variabili necessarie per l'elaborazione di una previsione meteorologica ad alta risoluzione spazio-temporale per 50 livelli verticali.

Primi test del modello

7 aprile 2016 La giornata risultava caratterizzata dalla presenza di un sistema depressionario localizzato a sud-ovest della Sicilia in lento spostamento verso est. Tale situazione ha richiamato un flusso di correnti caldo-umide dai quadranti meridionali, che ha investito in particolar modo le coste sud-occidentali dell'isola determinando precipitazioni diffuse su agrigentino, nisseno e basso trapanese. Precipitazioni di natura orografica si sono verificate anche sui rilievi dei monti Peloritani esposti ai flussi. In figura 2 viene riportato un confronto fra dati pluviometrici previsti dal modello WRF UniMe ed la rete osservativa del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS).

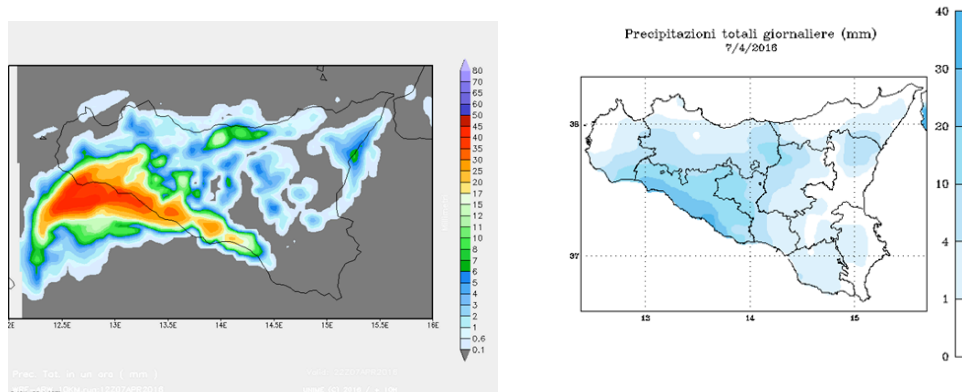


Figura 2 - Confronto fra dati pluviometrici previsti dal modello WRF UniMe (sinistra) ed la rete osservativa del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (destra).

8 Aprile 2016: Flussi meridionali continuano ad interessare la Sicilia. In figura 3 vengono mostrate le mappe di previsione del vento a 10 metri prodotte sul sottodominio sperimentale a 1 km sull'area del Messinese.

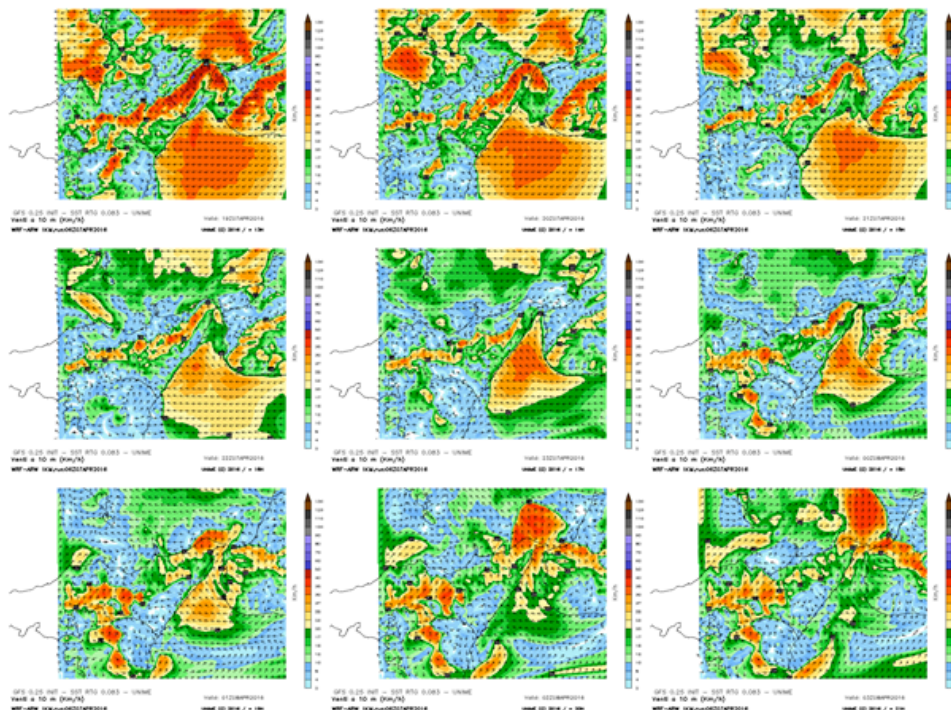


Figura 3- Intensità e direzione del vento a 10 metri previste dal modello meteorologico WRF-UniMe.

12 Aprile 2016: la Sicilia è investita da un'intensa avvezione di aria calda generata dall'espansione dell'anticiclone subtropicale nord-africano. Le temperature raggiungono per la prima volta nel corso dell'anno valori elevati, superiori ai 30 gradi con punte massime intorno ai 34 gradi su aree limitate del Siracusano.

In figura 4 vengono rappresentate le mappe prodotte dal Modello WRF-UNIME run del 12 aprile 2016 00UTC messe a confronto con i dati rilevati dalla rete osservativa del SIAS:

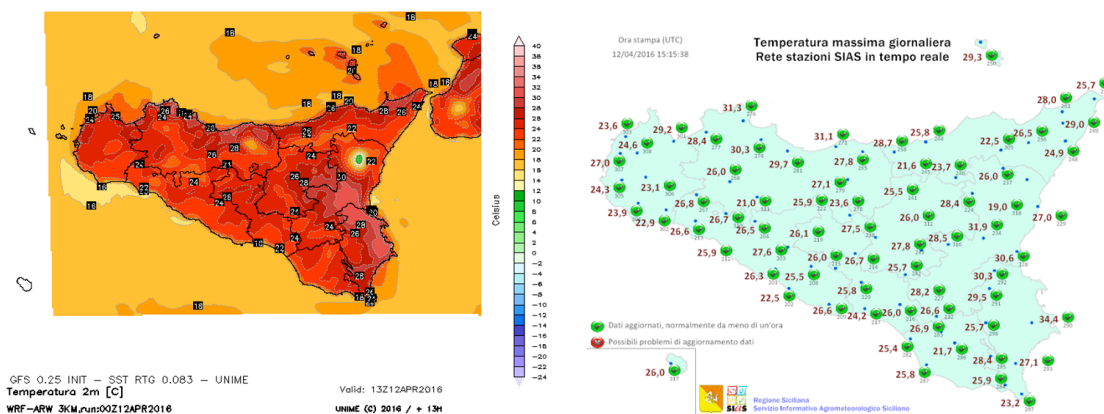


Figura 4 - Confronto fra temperature previste dal modello WRF UniME (sinistra) e rete osservativa del SIAS (destra).

Caso studio del 10 ottobre 2015: Alluvione di Barcellona Pozzo di Gotto (ME)

L'aumento significativo degli eventi meteorologici estremi a livello regionale, nazionale ed internazionale, genera sempre più interesse e preoccupazione nell'opinione pubblica. Risulta conclamato, difatti, che fenomeni quali alluvioni lampo, venti violenti e mareggiate provocano ripercussioni notevoli sulla vita quotidiana: frane, smottamenti, danni ad edifici ed all'agricoltura e, nelle circostanze più tragiche, perdita di vite umane.

Spesso in tali circostanze il grado di prevedibilità risulta piuttosto basso. E' fuori discussione, in effetti, la notevole difficoltà ad addentrarsi nell'esatta localizzazione spazio-temporale di precipitazioni particolarmente intense e di limitata estensione. Ma è davvero impossibile poter evitare i danni ingenti che si registrano ogni qual volta si verificano tali eventi?

Le condizioni meteorologiche che possono alzare il livello di rischio di fenomeni estremi sono ben conosciute dagli addetti ai lavori che possano vantare di una buona conoscenza dell'orografia locale ed abbiano maturato esperienza sulle risposte del territorio ad una determinata tipologia di sollecitazione: configurazioni bariche tipo, particolari perturbazioni atmosferiche, effetti topografici etc. L'obiettivo del gruppo di ricerca di Fisica Applicata è lo sviluppo di un modello meteorologico che non sostituisca il ruolo del previsore ma lo supporti nella lettura di effetti micro-climatici che sfuggono alla lettura dei modelli meteorologici esistenti.

Nel caso in esame, gli accumuli pluviometrici più elevati sono stati registrati sul settore ionico della provincia di Messina. La stazione SIAS di Antillo (non dotata di sistemi di allarme) ha registrato 223 mm in poche ore; un quantitativo di pioggia estremamente elevato nell'unità di tempo che è risultato il diretto responsabile dell'ondata di piena del Torrente Mela, il cui straripamento ha dato luogo all'inondazione registrata sul territorio di Milazzo e Barcellona Pozzo di Gotto. In tali comuni si sono registrati accumuli pluviometrici di poco conto (10 – 20mm): per tal motivo non si attendevano situazioni idrogeologiche critiche.

Tali eventi estremi si verificano fondamentale in presenza di cicloni mediterranei, nella fase pre – frontale e nel settore caldo del sistema depressionario. Soprattutto nella prima fase della stagione autunnale assistiamo sovente al transito ad una corposa serie di vortici ciclonici che, in rapida successione, spesso in formazione per cause di natura orografica sul nord Africa (sottovento alla catena dell'Atlante) o nelle Baleari (sottovento ai Pirenei) e poi sospinti sul Mediterraneo centrale dal ramo ascendente della Corrente a Getto Sub-Tropicale, raggiungono la nostra regione. Fatto l'ingresso nel Mare Nostrum, caratterizzato da temperature superficiali ben più elevate rispetto a quelle oceaniche, tali vortici ciclonici, alimentati dal basso, acquisiscono le ingenti riserve di energia termica (vapore acqueo e calore sensibile) e tendono ad approfondirsi rapidamente.

Nella fattispecie, nella notte tra il 9 e il 10 ottobre 2015, il centro di bassa pressione, posizionandosi tra la Tunisia e la nostra regione, attivò un intenso flusso di correnti meridionali, richiamando dalle coste libiche una massa d'aria piuttosto calda (addirittura 25 °C nella superficie isobarica di 850 hPa, ovvero ad un'altitudine di 1520 m di quota). I forti venti di Scirocco nei bassi strati, a contatto con la superficie marina, nel tratto di mare tra la Libia e la Sicilia, fecero registrare un'inevitabile impennata del tasso d'umidità relativa della massa d'aria d'origine nord-africana, accompagnata, dunque, da valori elevatissimi della temperatura potenziale equivalente nei bassi strati. L' "energia potenziale disponibile per la convezione", raggiunse punte addirittura superiori ai 4000 J/kg sui mari a sud della Sicilia. Tale serbatoio di calore, pronto ad essere convertito in energia cinetica, ovvero in forti correnti ascensionali, è stato innescato attraverso il sollevamento iniziale, evidentemente di natura meccanica, dello strato di aria calda prossimo al suolo. A svolgere il ruolo di scintilla sono stati i nostri rilievi esposti ai venti di Scirocco, ovvero quelli orientali, ed in particolare l'Etna ed i Peloritani, che favorirono l'ascesa forzata della massa d'aria calda ed umida diretta verso la Sicilia. Durante il mattino del 10 ottobre la nostra regione è stata interessata da una notevole attività cumuliforme che, complice un marcato "wind shear" verticale, per effetto del forte Scirocco al suolo e delle correnti sud-occidentali negli strati immediatamente sovrastanti, ha generato cellule temporalesche anche particolarmente intense proprio nell'area tra Messinese ionico e il versante orientale dell'Etna. I modelli matematici a scala globale, in quella occasione, non

hanno prospettato valori degni di nota nel campo delle precipitazioni; nella figura 5 vengono riportate le mappe generate dal modello WRF-UniMe a 10, 4 ed 1 km di risoluzione ed il confronto con la rete osservativa del DRPC.

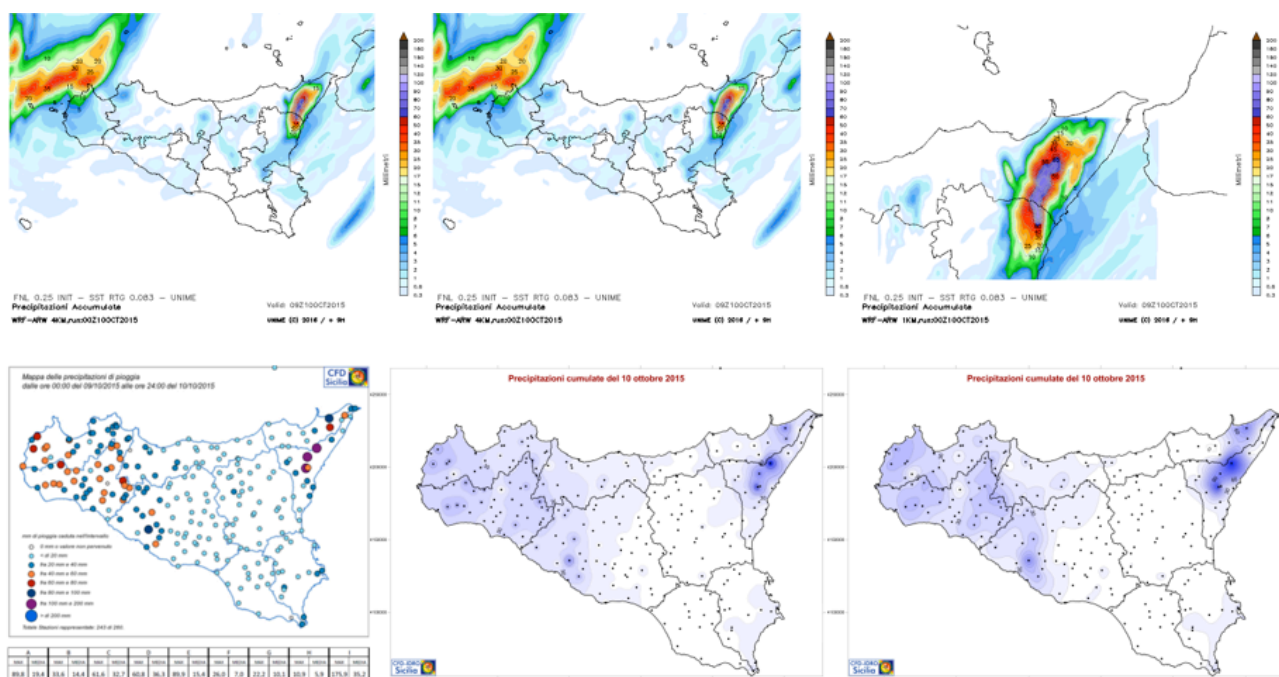


Figura 5 - Confronto fra le precipitazioni previste dal modello meteorologico WRF UniMe a diverse risoluzioni (sopra) e la rete osservativa del Dipartimento Regionale di Protezione Civile (sotto).

Conclusioni

Il test effettuato sull'episodio del 10 ottobre 2015 evidenzia che il modello WRF-UNIME ottimizzato per la Sicilia ha dato dei risultati positivi che hanno colto perfettamente sia la localizzazione spaziale delle precipitazioni che i quantitativi poi verificatisi.

Inoltre, l'utilizzo di dati geografici statici alternativi (Aster DEM e Corine LANDUSE) ha migliorato sensibilmente la previsione degli accumuli finali nelle zone alluvionate.

Riferimenti bibliografici

- Janjic Z.I., (2002) "Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model". Technical Report office note 437. NOAA Science Center.
- Kain J.S., (2004) "The Kain–Fritsch convective parameterization: an update", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 43, 170–181.
- Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K., (2004) "Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: description and sensitivity analysis", *Monthly Weather Review*, 132, 519–542.
- Pineda N., Jorba O., Jorge, J., Baldasano J. M., (2004), "Using NOAA AVHRR and SPOT VGT data to estimate surface parameters: application to a mesoscale meteorological model", *International Journal of Remote Sensing*, 25, 129-143.
- De Meiji A., Vinuesa J., (2014) "Impact of SRTM and Corine Land Cover data on meteorological parameters using WRF", *Atmospheric Research*, 143, 351–370.
- Cassola F., Ferrari, F., Mazzino, A. (2015) "Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification", *Atmospheric Research*, 164, 210–225.