

IL RADAR DI MONTE

Uso del radar di Monte Macaion per la sorveglianza Meteo-Idrologica del bacino del fiume Adige

Marco Borga

Dipartimento Territorio e Sistemi
Agro-Forestali
Università di Padova
Via dell'Università 16
35020 Legnaro – Padova

Carlo Dal Piaz e Marta Pendesini

Meteotrentino
Galleria dei Legionari Trentini 5
38100 Trento

Mauro Tollardo

Ufficio Idrografico
Provincia Autonoma di Bolzano
Via della Mendola 33
39100 Bolzano



Il radar per le previsioni meteo offre l'opportunità di migliorare la nostra capacità di osservare le perturbazioni e quantificare le relative precipitazioni.

Uno dei principali vantaggi del radar è la sua capacità di monitorare piogge estreme su un'ampia gamma di scale spaziali e temporali.

Il presente articolo fornisce una descrizione del sistema radar installato sul Monte Macaion con i primi risultati ottenuti.

INTRODUZIONE

La mitigazione del rischio idro-meteorologico relativo al territorio dell'alto bacino del fiume Adige costituisce uno degli obiettivi dell'attività dell'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano. Diverse sono le iniziative intraprese a tale scopo: dallo sviluppo di un'efficiente attività di previsione meteorologica all'organizzazione di un servizio di previsione meteo-idrologica finalizzato alla gestione del rischio di piena in condizioni di emergenza.

Nell'ambito di questo disegno complessivo, un ruolo particolare assume l'attività di sorveglianza meteo-idrologica resa possibile dal flusso di informazioni assicurato dal radar meteorologico di Monte Macaion.

Tale strumento ha esteso e perfezionato considerevolmente la possibilità di osservare in tempo reale, con elevata risoluzione spaziale e temporale, la struttura dei campi di precipitazione.

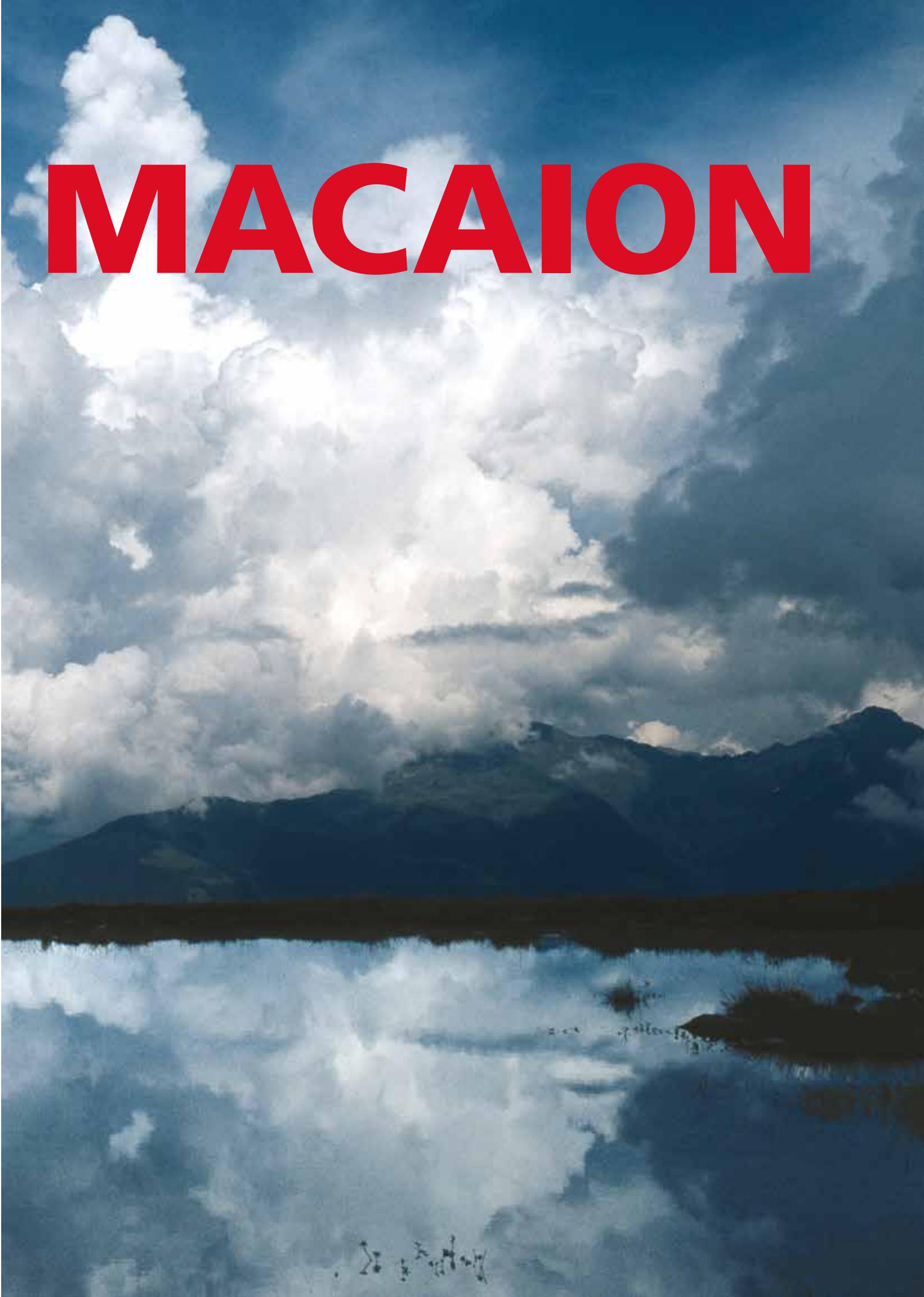
Il suo impiego presenta alcuni sostanziali vantaggi rispetto a quanto si può ottenere con una

rete di stazioni pluviometriche.

Il radar meteorologico offre infatti le seguenti opportunità (Creutin e Borga, 2003):

- visione globale, in tempo reale, dei fenomeni di precipitazione in atto su un'area molto vasta, e determinazione dell'intensità di precipitazione;
- monitoraggio della precipitazione con continuità spaziale, e quindi possibilità di rilevare anche fenomeni intensi e localizzati;
- analisi tridimensionale dei campi di pioggia;
- possibilità di seguire lo spo-

MACAION



Posizione del radar di Monte Macaion

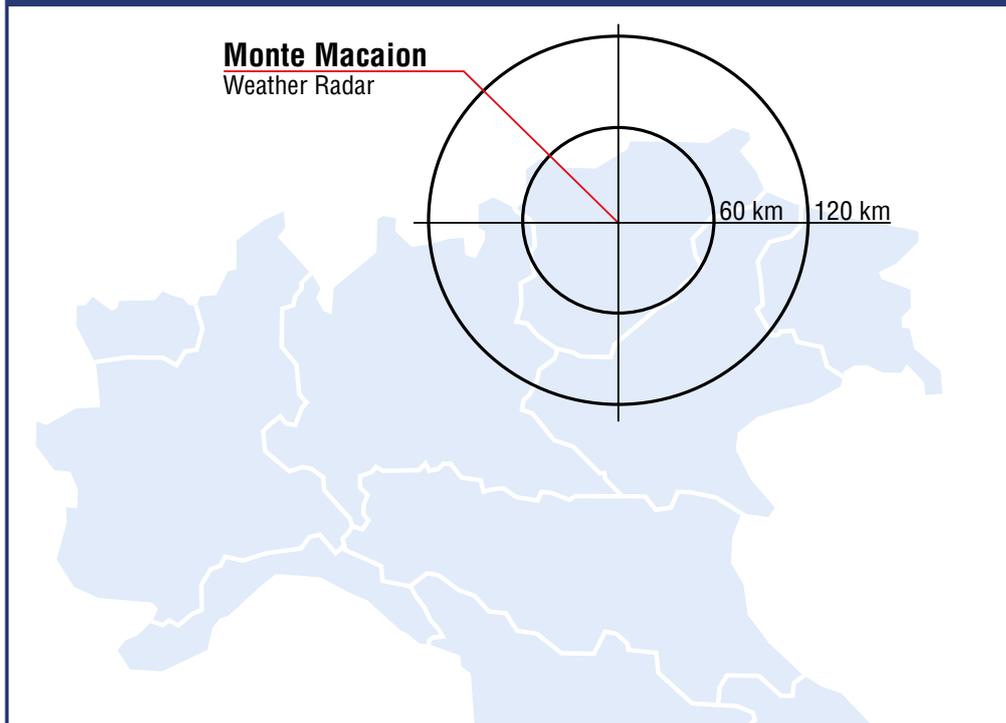


Fig. 1



stamento e l'evoluzione dei fenomeni e di individuare le zone che potranno essere interessate da precipitazione nell'immediato futuro.

In particolare, il radar meteorologico ha dimostrato una notevole efficacia nel monitoraggio dei fenomeni a spiccata caratterizzazione locale, quali, ad esempio, le celle temporalesche.

La possibilità di prevedere l'evoluzione temporale di un campo di precipitazione, a partire dalla sua osservazione tramite radar, discende dalla continuità spaziale di tale osservazione

relativa una regione piuttosto vasta (dell'ordine dei 10.000 km²). Confrontando fra loro mappe successive di precipitazione radar, ed analizzando la loro struttura tridimensionale, è possibile pervenire ad una sintetica descrizione della dinamica dell'evento meteorico, in grado di fornire informazioni sull'evoluzione a brevissimo termine del fenomeno osservato (Wilson et al., 1998; Mecklenburg et al., 2000).

Le osservazioni radar possono inoltre essere integrate con osservazioni satellitari (per es. di tipo METEOSAT, con prospettive particolarmente interessanti per il Meteosat di seconda generazione), ed hanno evidenziato un'importante utilizzazione per l'inizializzazione e la validazione dei modelli numerici meteorologici a scala limitata.

Queste caratteristiche sono di grande interesse per la corretta gestione delle previsioni meteorologiche di precipitazione in una regione caratterizzata da un accentuato rilievo orografico

come quella dell'alto bacino dell'Adige.

Infatti, l'esperienza indica che le previsioni numeriche di precipitazione relative a regioni ad orografia complessa sono da usarsi con molta cautela, e che esse devono essere integrate da conoscenze sinottiche e regionali dettagliate, derivate da esperienza acquisita sul territorio. L'utilizzazione dell'informazione radar, in questo caso, assume un duplice valore. Da una parte, essa diventa elemento essenziale per la verifica continua, ad ampia scala spaziale, della accuratezza delle previsioni conseguite tramite modelli numerici. Dall'altra, la conoscenza dettagliata degli effetti regionali acquisita tramite l'analisi delle immagini radar consente al previsore una differenziazione regionale della previsione numerica.

Con questa memoria si intende presentare il sistema radar, il servizio di sorveglianza meteorologica ed alcuni risultati preliminari ottenuti nei primi anni di attività. La memoria è articolata in n. 4 sezioni: viene inizialmente descritto il sistema radar (sezione 2), del quale vengono successivamente illustrate le utilizzazioni nell'ambito del sistema di monitoraggio meteorologico (sezione 3). Nella quarta e ultima sezione vengono infine descritte una serie di procedure operative, assistite da procedure software specificatamente sviluppate, volte alla ottimizzazione dell'impiego delle osservazioni radar nella gestione dell'emergenza.

IL SISTEMA DI RADAR SORVEGLIANZA METEO-IDROLOGICA

Lo sviluppo del sistema radar di Monte Macaion ha preso le mosse in seguito alla decisione dell'Autorità di Bacino dell'Adige,

presa in sede di Comitato istituzionale il 17 febbraio 1997, di organizzare, in concertazione con le Province Autonome di Trento e Bolzano e con la Regione Veneto, un centro di monitoraggio meteo-idrologico, con specifica attenzione ai fenomeni di piena e di rischio idrogeologico. Il sistema radar è stato quindi attivato preliminarmente nell'estate del 2000, per conseguire un completo sviluppo nel 2001.

A partire dalla primavera del 2003, il sistema radar è passato sotto il controllo delle Province di Trento e di Bolzano, che ne coordinano in modo congiunto l'attività.

L'antenna radar è collocata sul Monte Macaion, a 1860 m s.l.m. (Fig. 1 e foto sotto). Il radar è un sistema Doppler EEC DWSR-2500 C, in banda C; le caratteristiche tecniche sono riportate nella figura 2.

La realizzazione di un sistema di monitoraggio radar come quello considerato, nella prospettiva di utilizzazione idrologica delle osservazioni radar, ha richiesto l'esame preliminare di diverse condizioni, ed in particolare della struttura orografica della regione di interesse. In particolare, l'individuazione dei siti ottimali atti a ospitare l'antenna radar ha evidenziato l'esigenza di considerare alcune esigenze contrastanti. L'installazione del radar in posizione elevata consente infatti di estendere l'orizzonte dello strumento, ma vincola il radar ad esplorare, ad una certa distanza dal sito di installazione, porzioni di atmosfera dove la precipitazione può non essere rappresentativa di quanto accade in prossimità del suolo. L'installazione in posizione più depressa consente di misurare la precipitazione vicino al suolo, ma determina una capacità di osservazione che può

essere considerata insufficiente. E' apparso quindi necessario privilegiare l'installazione dello strumento in posizione elevata, e configurare il sistema in modo tale da rendere minima l'incidenza degli errori conseguenti. E' risultato inoltre necessario adottare un sistema di osservazione in grado di individuare gli echi spuri dovuti alla retrodiffusione del segnale elettromagnetico da parte del terreno, di cui un sistema di osservazione radar come quello delineato può soffrire. Si noti che la scelta di installare gli strumenti in corrispondenza di siti elevati determina una maggiore incidenza dei costi legati all'esigenza di assicurare che la strumentazione possa operare, senza degrado delle prestazioni, in ambiente climaticamente difficile (basse temperature ed elevate velocità del vento), alla installazione e manutenzione degli apparecchi ed alla realizzazione ed alla operatività dei collegamenti.

È opportuno a questo punto ricordare che il radar meteorologico non è in grado di fornire una misura diretta dell'intensità di precipitazione. L'osservazione radar della pioggia in atmosfera si basa infatti sull'impiego di un certo numero di algoritmi, in grado di trasformare in riflettività il valore di potenza retrodiffusa dal volume di atmosfera osservato

dal radar, e convertire quindi detta riflettività in intensità di precipitazione. Il risultato dell'impiego di tali algoritmi viene evidentemente alterato quando le ipotesi di lavoro (talvolta non integralmente esplicitate) poste alla loro base non sono verificate nella realtà. L'uso operativo del radar meteorologico richiede quindi l'adozione di un sistema di elaborazione delle misure radar che può essere di notevole complessità, dovendo esso riconoscere e correggere, in modo automatico, diverse potenziali sorgenti di errore.

In conformità all'obiettivo di fornire una stima della intensità di precipitazione in atto, è opportuno sottolineare l'importanza degli errori legati alla variazione delle dimensioni e della quota del volume di campionamento radar all'aumentare della distanza dall'antenna a fronte di una marcata variabilità verticale del campo di riflettività. L'influenza della geometria del campionamento sull'accuratezza della stima radar di precipitazione dipende dal tipo di precipitazione. Nel caso di precipitazioni convettive l'aumento del volume di campionamento con la distanza dal sito radar si traduce essenzialmente in una attenuazione dei picchi di precipitazione, mentre per le precipitazioni di tipo stratiforme si possono riconoscere degli er-

Fig. 2

Caratteristiche tecniche del sistema radar di Monte Macaion.

Parametro	Valore
Range massimo (Doppler)	120 km
Risoluzione in range	250 m
Ampiezza del fascio (3 dB)	0.9°
Potenza di picco	307.0 kW
Lunghezza d'onda	5.3 cm (C band)
Tempo di aggiornamento	6 minuti
Durata dell'impulso	0.8 s
Guadagno d'antenna	45.8 dB
Scansione (12 elevazioni)	1.0°; 2.0°; 3.0°; 4.0°; 5.0°; 6.0°; 8.0°; 10.0°; 13.0°; 16.0°; 19.5°; 24.0°

rori di sovrastima e di sottostima legati alla variabilità verticale sia dell'intensità che dello stato di aggregazione (solido o liquido) della precipitazione. Per questo tipo di precipitazione, infatti, l'intercettazione dello strato di fusione (lo strato in corrispondenza del quale la precipitazione da solida diventa liquida) da parte del fascio radar causa una forte variazione nel valore del segnale misurato, determinata dalle diverse proprietà dielettriche delle particelle intercettate, che può determinare forti sovrastime dell'intensità di precipitazione. Si noti che la scelta, considerata preferibile, di collocare gli strumenti di osservazione in posizione elevata aumenta la probabilità di incorrere in questo tipo di errore (Joss e Lee, 1995; Borga et al., 1997; Borga et al., 2000; Krajewski e Smith, 2003).

Il sistema di monitoraggio radar di Monte Macaion è concepito innanzitutto per la stima e la previsione dei campi di precipitazione, in tempo reale, con grado di dettaglio e di accuratezza tale da poter fornire dati ed indicazioni per l'attivazione di opportune contromisure in caso di condizioni meteorologiche estreme (e dei fenomeni di piena dei corsi d'acqua in particolare). E' chiaro, tuttavia, che i benefici conseguibili tramite tale sistema non si limitano al solo aspetto idrologico e di supporto

alle decisioni da assumere in un contesto di protezione civile. Ricadute operative possono conseguirsi in altri settori, quali l'attività turistica, l'agricoltura, la gestione ottimale dei sistemi di drenaggio urbano, la gestione del sistema dei trasporti, etc.

RUOLO DEL RADAR NELL'AMBITO DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO METEO-IDROLOGICO

Il radar è uno strumento che consente di rilevare la presenza di oggetti distanti, di localizzarli nello spazio e di ottenere informazioni sulla loro natura fisico-geometrica. Nel caso particolare di un radar meteorologico tali oggetti sono tipicamente le idrometeore, siano esse gocce di pioggia oppure neve, grandine, pioggia ghiacciata. Esso consente quindi di stimare l'intensità di precipitazione su un'area di estensione notevole.

Le scale di campionamento spaziale e temporale che caratterizzano tale stima sono di rilevanza per gli scopi di modellistica idrologica, soprattutto per quanto riguarda l'analisi di piccoli e medi bacini idrografici, caratterizzati da rapido tempo di risposta alle sollecitazioni meteoriche. E' noto infatti dall'analisi delle strutture spazio-temporali dei campi di precipitazione, che la stima di precipitazione media areale in

corrispondenza di un'assegnata area di supporto richiede, al diminuire dell'intervallo di aggregazione temporale ed a parità di varianza di stima, un aumento della densità di campionamento. Tale incremento è spesso tale da scontrarsi con l'effettiva disponibilità di dati di precipitazione dalle reti di pluviografi, soprattutto nelle condizioni di monitoraggio in tempo reale. Le stime radar di precipitazione possono quindi costituire un valido complemento alle reti di pluviografi (e, nel caso di fenomeni di piena improvvisa, l'unica fonte di dati disponibile) per il calcolo dell'afflusso meteorico nelle condizioni su indicate, a condizione che gli errori presenti nelle stime radar di pioggia vengano adeguatamente rimossi.

Il radar meteorologico ha pertanto esteso e perfezionato considerevolmente la possibilità di osservare in tempo reale, con elevata risoluzione spaziale e temporale, la struttura dei campi di precipitazione.

Come già ricordato, confrontando fra loro mappe successive di precipitazione radar è possibile pervenire ad una sintetica descrizione della dinamica dell'evento meteorico, individuando una direzione di spostamento dell'idrometeora. Negli schemi più semplici, la previsione agli istanti successivi viene conseguita operativamente estrapolando gli ultimi campi di precipitazione osservati nella direzione ed alla velocità del moto precedentemente identificato. Procedure previsionali più evolute consentono di tenere in conto anche gli aspetti di crescita e di decadimento delle celle convettive eventualmente contenute nel campo di precipitazione osservato. Si tratta, in questi casi, di modelli meteorologici semplificati che consentono di incor-



porare quanta più informazione radar possibile nella simulazione modellistica del fenomeno.

E' evidente che schemi previsionali come quelli appena delineati possono essere sufficienti quando l'orizzonte temporale di interesse è pari a qualche ora. Previsioni quantitative di precipitazione su orizzonti temporali più prolungati sono conseguibili solamente utilizzando modelli numerici di previsione. Solitamente, i modelli a scala sinottica dei principali centri meteorologici europei (Reading, Offenbach), maggiormente affetti da errori proprio su regioni ad orografia complessa come quella qui considerata, risultano inadatti a evidenziare la distribuzione spaziale della nuvolosità e delle precipitazioni. I modelli ad area limitata, che utilizzano le previsioni dei modelli sinottici quali condizioni al contorno e consentono la rappresentazione dei fenomeni meteorologici su una griglia più fine, sono generalmente indicati come maggiormente affidabili nella previsione dei quantitativi di pioggia. Tuttavia, anche in questo caso la rappresentazione della struttura orografica fornita dal modello è molto semplificata e gli errori conseguenti possono essere rilevanti. L'esperienza acquisita in questo campo indica che le previsioni numeriche di precipitazione relative a regioni ad orografia complessa sono da usarsi con molta cautela, e che esse devono essere integrate da conoscenze sinottiche e regionali dettagliate, derivate da esperienza acquisita sul territorio. L'uso dell'informazione radar, in questo caso, assume un duplice valore. Da una parte, essa diventa elemento essenziale per la verifica continua, ad ampia scala spaziale, della accuratezza delle previsioni conseguite tramite modelli numerici. Dal-

l'altra, la conoscenza dettagliata degli effetti regionali acquisita tramite l'analisi delle immagini radar consente al previsore una differenziazione regionale della previsione numerica. E' interessante inoltre osservare che le osservazioni da radar meteorologico giocano un ruolo essenziale nello sviluppo e nella implementazione dei modelli meteorologici di previsione di pioggia più sofisticati (non-idrostatici, a scala locale). Infatti, in questo caso le osservazioni radar sono importanti da due punti di vista: **1)** possono rappresentare le condizioni iniziali a partire dalle quali il modello meteorologico numerico di previsione sviluppa successivamente la previsione; **2)** sono le uniche osservazioni disponibili per la validazione tridimensionale delle simulazioni e previsioni conseguibili dai modelli numerici.

Per le ragioni appena indicate, il miglioramento delle previsioni di precipitazione a breve termine sembra conseguibile utilizzando, secondo un albero decisionale, i modelli numerici di previsione e i flussi cospicui di dati forniti, in tempo reale, da radar meteorologico e da satellite.

USO OPERATIVO DEL SISTEMA RADAR DI MONTE MACAION

Nel corso dei primi due anni di attività del centro idro-meteo di Monte Macaion un'importanza specifica è stata attribuita al monitoraggio di fenomeni intensi di origine convettiva, in grado di provocare ingenti danni e pericolo per le vite umane, con effetti al suolo legati all'innescamento di inondazioni improvvise, colate detritiche e frane superficiali. Si tratta di fenomeni di estensione spaziale modesta (da qualche decina a qualche centinaio di chi-

lometri quadrati), che, pur localmente rari, tendono comunque a presentarsi frequentemente in ambito regionale (si ricordano, fra gli eventi calamitosi, quelli di Fortezza, il 13 agosto 1998, di Termeno, il 12 giugno 2001, di Cortaccia, il 27 giugno 2001, di Vandoies, il 12 luglio 2002).

In ragione della limitata estensione spaziale di questi fenomeni, la rete di strumenti pluviografici, pur densa (con uno strumento in teletrasmissione ogni 100 km² circa), non è tuttavia in grado di catturare la corretta distribuzione spaziale delle precipitazioni che li originano; il monitoraggio di tali eventi può quindi essere condotto esclusivamente tramite radar. L'obiettivo del monitoraggio che così si consegue è duplice: 1) supporto alle attività di protezione civile; 2) analisi ed interpretazione dei fenomeni intensi.

L'esperienza che è stata condotta nei primi anni di attività ha indicato che le attività di protezione civile possono giovare in modo decisivo della possibilità di individuare con anticipo le piogge in grado di innescare effetti localmente pericolosi sul territorio. E' chiaro che l'anticipo potenzialmente conseguibile tramite tale monitoraggio è in genere modesto (compreso fra 30 minuti ed 1 ora). Tuttavia, anche in virtù della capillare copertura del territorio in termini di personale attrezzato ed in grado di intervenire con la massima tempestività, la sorveglianza radar meteorologica si è dimostrata estremamente utile al fine di distribuire le forze disponibili sul territorio e garantirne l'operatività con margine accettabile di rischio. Infatti, l'intervento di protezione civile viene attuato spesso ad evento calamitoso ancora in corso, con personale e popolazione esposta al pericolo

di un eventuale peggioramento del quadro in atto. I rischi connessi a tali situazioni possono essere controllati e gestiti in maniera conservativa tramite il monitoraggio meteo-idrologico continuo e dettagliato.

Le osservazioni radar vengono inoltre utilizzate in maniera ormai routinaria in ambito provinciale per la descrizione dei fenomeni che hanno determinato effetti calamitosi al suolo. Tale sforzo, indubbiamente cospicuo, è motivato dall'osservazione che la base sperimentale e scientifica disponibile per descrivere e quantificare la risposta dei bacini idrografici rispetto alle precipitazioni brevi ed intense è ancora frammentaria ed incerta, soprattutto in ragione delle obiettive difficoltà che insorgono nell'osservazione di fenomeni localmente poco frequenti (Bonell, 1998; Torres et al., 1998; McGlynn et al., 2002; Dalla Fontana, 2003). I fenomeni di piena improvvisa, associati spesso a processi di trasporto di massa, sono pertanto contraddistinti da

una cronica mancanza di dati, sia per quanto riguarda i volumi e le intensità dell'apporto meteorico, sia per quanto attiene agli stati idrici nei corsi d'acqua ed all'eventuale trasporto di sedimenti (D'Agostino e Marchi, 2001). La metodologia di registrazione e descrizione attivata include la fase di georeferenziazione dei fenomeni, la quantificazione degli aspetti salienti sotto l'aspetto sia idrologico che idraulico, e la registrazione di informazioni circa i danni determinati. Le osservazioni radar consentono di chiarire il quadro fenomenologico che caratterizza tali eventi, e di affinare nel tempo le tecniche di gestione del territorio e dei corsi d'acqua al fine di mitigare le sorgenti naturali del rischio idrogeologico. L'analisi degli eventi finora raccolti (Tonelli et al., 2003) ha permesso di chiarire che le celle temporalesche considerate hanno una spiccata caratteristica rigenerativa, legata anche all'orografia, e tendono quindi a persistere su una località ben oltre la vita media di un

temporale (30 minuti), alternando varie fasi con diverse intensità di precipitazione.

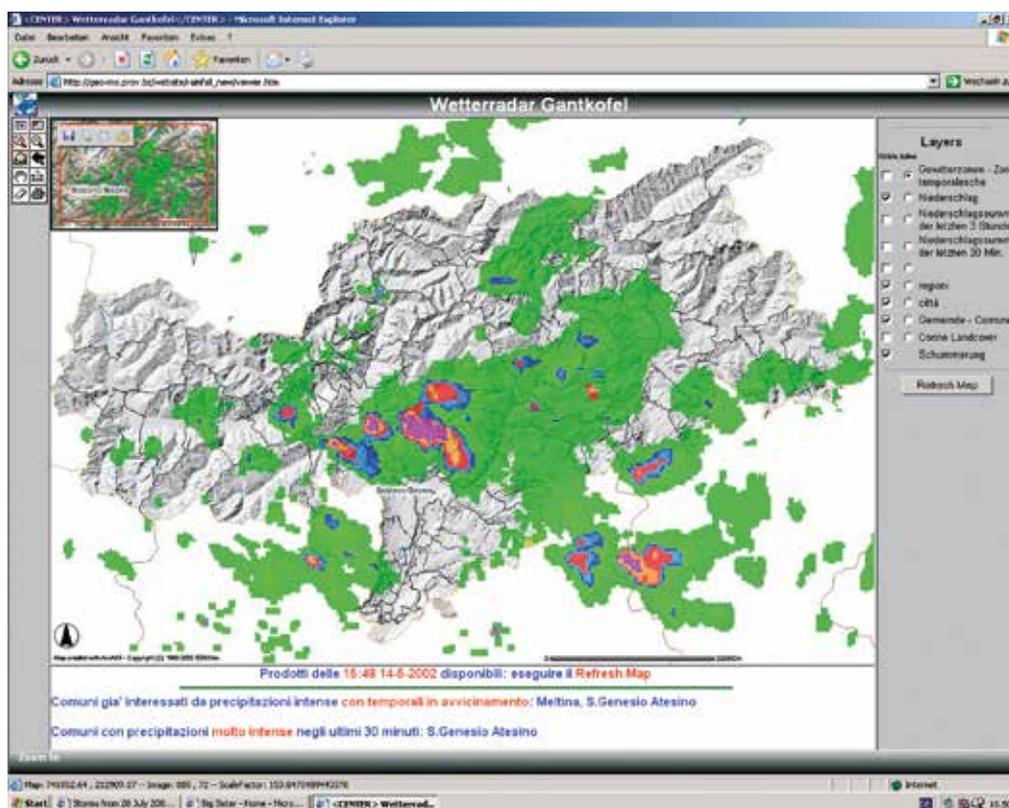
L'impiego del sistema di Monte Macaion nella catena operativa di gestione dell'emergenza ha richiesto lo sviluppo di due distinti sistemi di monitoraggio, uno volto alla sorveglianza del corretto funzionamento del sistema stesso (posto in località remota), ed il secondo finalizzato alla gestione continua del flusso di informazioni garantito dal sistema radar.

Nel primo caso è stato sviluppato un sistema di telecontrollo che permette non solo di ottenere in qualsiasi momento informazioni complete circa lo stato del sistema e una notifica immediata della presenza di una avaria, ma anche di interagire (via sms) accendendo o spegnendo la macchina o, semplicemente, cambiandone il tipo di acquisizione (es. le elevazioni di ciascun volume e la frequenza di acquisizione) o i parametri di elaborazione.

Tale sistema permette una maggiore continuità di funzionamento del radar e garantisce all'operatore la possibilità di intervenire da remoto per il ripristino del funzionamento (nel caso di avarie non importanti) o di spegnere il sistema evitando che il danno diventi tale da non permettere la riparazione in tempi brevi.

Il sistema di controllo delle osservazioni radar e di preavviso di condizioni di emergenza è articolato in una serie di procedure, descritte sinteticamente in seguito. Esso è basato sull'impiego di osservazioni radar il più possibile prossime al suolo; una serie integrata di algoritmi volti alla correzione di tali osservazioni al fine di rimuovere gli errori dovuti al profilo verticale di riflettività ed attenuazione, all'occlusione del fascio, alla presenza

Fig. 3
RadarMeteoBrowser
temporali nei pressi
di Merano



di grandine, ed alla presenza di echi di terra, è attualmente in corso di sviluppo.

Tutte le informazioni (georeferenziate) così raccolte vengono elaborate tramite GIS (GRASS5) ed indirizzate per la visualizzazione su una piattaforma informatica (RadarMeteoBrowser, Figura 3) creata appositamente per associare l'informazione da radar con gli elementi descrittivi di dettaglio del territorio, rendendone quindi facilmente interpretabile il contenuto informativo.

L'individuazione delle situazioni di possibile criticità sul territorio, si avvale dell'incrocio fra due diverse informazioni: una relativa all'intensità dell'evento, e caratterizzata dal valore di intensità di pioggia negli ultimi 30 minuti; la seconda relativa alla precipitazione cumulata in tre ore consecutive, ed intesa ad evidenziare i settori precedentemente esposti a precipitazioni abbondanti, e quindi eccedenti soglie pluviometriche di allarme.

In sintesi, le elaborazioni dei dati svolte ad ogni acquisizione del radar (ovvero ogni 6 minuti) si articolano come segue:

- vengono individuati i settori interessati da precipitazioni particolarmente abbondanti nelle ultime tre ore (ovvero caratterizzate da valori eccedenti una soglia preassegnata); vengono individuate le celle temporalesche e ricostruiti i loro movimenti negli ultimi 30 minuti;
- viene calcolata la precipitazione cumulata negli ultimi 30 minuti su tutto il territorio e vengono individuati i settori caratterizzati da precipitazioni superiori a due soglie prestabilite; la posizione di tali settori viene mantenuta in memoria dal software per le 3 ore successive;
- nel caso in cui il valore areale cumulato nei 30 minuti sia superiore ad un valore di soglia,

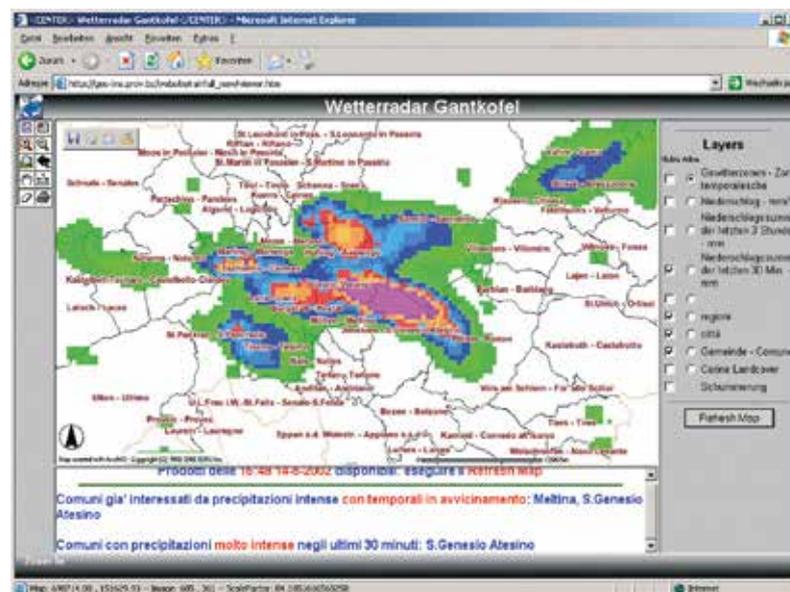


Fig. 4
RadarMeteoBrowser
Nel frame superiore viene visualizzata la precipitazione cumulata negli ultimi 30 minuti. Nel frame inferiore compaiono automaticamente gli avvisi derivanti dall'analisi del dato attuale e del recente passato

viene generato automaticamente un avviso contenente il nome del comune interessato; l'avviso viene visualizzato nel RadarMeteoBrowser (Figura 4). Nel caso in cui si ecceda invece una seconda soglia (inferiore alla prima), i settori di interesse vengono semplicemente memorizzati per un confronto successivo con i nuovi dati;

- viene effettuato un confronto tra il movimento delle celle temporalesche e i settori caratterizzati da precipitazioni abbondanti nelle ultime 3 ore (vedi punto precedente). Nel caso in cui una o più celle stiano per interessare o interessino direttamente un'area già colpita nelle ultime 3 ore, viene generato e trasmesso un avviso (sempre visualizzato nel RadarMeteoBrowser) ad una serie di indirizzi preassegnati (Figura 4). Il sistema di sorveglianza meteo-idrologica così articolato è sufficientemente semplice per essere compreso anche da utenti ed operatori privi di esperienza diretta in campo idrologico e meteorologico, e si è rivelato efficace ed efficiente nella sua gestione durante i due anni appena trascorsi (2002 e 2003). Alcune iniziative di ricerca sono in corso al fine di affinare la stima di precipitazione in zone

a scarsa visibilità ed al fine di incrementare il livello di confidenza nei preavvisi di allarme così generati.

BIBLIOGRAFIA

- Borga, M., E.N. Anagnostou e E. Frank, 2000: On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins. *Journal of Geophysical Research*, 105, D2, 2269-2280.
- Borga, M., E.N. Anagnostou e W.F. Krajewski, 1997: A simulation approach for validation of a bright band correction method. *Journal of Applied Meteorology*, 36(11), 1507-1518.
- Creutin, J.D. e M. Borga, 2003: Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard. Invited commentary. 10.1002/hyp.5122, *Hydrological Processes*, 17, 7, 1453-1456.
- Joss, J., e R. Lee, 1995: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 2612-2630.
- Krajewski, W.F., e J.A. Smith, 2002. Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources*, 25, 1387-1394.
- Wilson, J.W., N.A. Crook, C.K. Mueller, J. Sun, e M. Dixon, 1998: Nowcasting thunderstorms: a status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2079-2099.
- Tonelli, F., M. Borga, M. Tollardo e M. Pendesini, 2003: Radar rainfall estimation assessment for heavy rainfall events. 1st ACTIF Workshop on "Combination of data from remote sensing technologies for flood forecasting", Bologna 24-25 Novembre 2003.
- Bonell, M., 1998. Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (4), 765-785.
- D'Agostino, V., Marchi, L., 2001. Debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps: data collection and analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C*, 26(9), 657-663.
- Dalla Fontana, G., 2003: Processi di generazione e trasporto del deflusso sottosuperficiale alla scala di versante. *Quadreni di Idronomia Montana*, n. 20, 2003.
- McGlynn, B.L., McDonnell, J.J., D.B. Brammer, 2002. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchments, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 257, 1-26.
- Torres, R., Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., Anderson, S.P. and Loague, K., 1998. Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research* 34 8, 1865-1879.