
I FENOMENI METEOROLOGICI ESTREMI

di Alberto Fortelli (Distar-Unina)

7.1. Introduzione

Negli ultimi anni si sta manifestando una crescita della frequenza di accadimento di una vasta gamma di fenomenologie meteorologiche di tipo estremo, capaci di generare situazioni di criticità sia sul territorio considerato come entità fisica sia a carico delle popolazioni che su di esso risiedono.

Tra di esse è possibile citare le “Ondate di calore “ (Heat waves), i nubifragi, i tornado, i cicloni simil-tropicali in area mediterranea (TLC – Medicanes), le grandinate estreme, ecc.

La maggioranza dei ricercatori in campo climatologico attribuisce tale dinamica al Riscaldamento Globale.

Tali fenomenologie, in particolare quelle generate da precipitazioni abbondanti, sono particolarmente pericolose per l’Italia, che è uno dei Paesi più instabili d’Europa dal punto di vista idrogeologico: circa il 4% del territorio italiano si trova in un’area ad elevato pericolo di alluvioni, l’8,4% in uno scenario di pericolosità media e un altro 10,9% a pericolosità bassa. In totale, oltre due milioni di persone sono esposte a rischio elevato e 6,1 milioni a pericolo medio (ISPRA – Rapporto Rendis 2020).

L’Italia si trova, infatti, al centro di un’area geografica, il Mediterraneo, considerata dagli scienziati una *focus area* in termini di esposizione agli effetti negativi dovuti al cambiamento climatico.

I dati che riguardano l’Italia destano una sempre maggiore preoccupazione in quanto, anno dopo anno, si manifesta un significativo incremento del numero dei

comuni nei quali si manifestano fenomeni meteorologici estremi (oltre 600 nel 2021, con un incremento del 18% rispetto all'anno precedente).

Inoltre, al mero fattore quantitativo, si associa anche un fattore di espansione areale, con un maggiore coinvolgimento di zone geografiche che in precedenza risultavano solo marginalmente ed occasionalmente interessate da tali fenomenologie estreme quali allagamenti, frane, esondazioni, danni alle infrastrutture, al patrimonio storico, provocati da trombe d'aria o da temperature anormalmente elevate o basse.

I fenomeni meteorologici estremi, dal 2010 al 1° novembre 2021, sono stati 1.118, di cui 133 nell'ultimo anno (*Osservatorio Città Clima di Legambiente-Rapporto 2021*): più nel dettaglio, ci sono stati 486 casi di allagamenti dovuti a piogge intense, 406 casi di interruzione dell'esercizio di infrastrutture varie dovuti a piogge intense, 308 eventi con danni causati da trombe d'aria, 134 eventi causati da esondazioni fluviali, 48 casi di danni provocati da prolungati periodi di siccità e temperature estreme, 41 casi di frane causate da piogge intense, 18 casi di danni al patrimonio storico e artistico.

Tali fenomeni estremi non risparmiano i maggiori insediamenti urbanistici d'Italia; di seguito si riportano alcuni dati relativi al periodo dal 2010 al 1° novembre 2021:

- Roma: 56 eventi, 9 solo nell'ultimo anno, di cui ben oltre la metà (32), hanno riguardato allagamenti a seguito di piogge intense;
- Bari: 41 eventi, principalmente allagamenti da piogge intense (20) e danni da trombe d'aria (18);
- Milano: 30 eventi, con 20 esondazioni dei fiumi Seveso e Lambro.

Il Rapporto 2021 individua anche 14 aree del Paese dove si ripetono con maggiore intensità e frequenza alluvioni, trombe d'aria e, in alcuni casi negli stessi territori, ondate di calore. Nella costa romagnola e nord delle Marche e nella Sicilia orientale sono stati numerosi i record registrati nel corso del 2021: a Siracusa l'11 agosto, si è raggiunto il record europeo del caldo con 48,8 °C.

7.2. Impatto finanziario dei danni da fenomenologie idrologiche ed idrogeologiche

I danni di maggiore entità sono causati dagli eventi pluviometrici estremi, in grado di indurre fenomenologie alluvionali e forme diversificate di dissesto idrogeologico.

Di seguito si riporta una tabella che indica in maniera dettagliata, regione per regione, una stima dei danni causati da queste fenomenologie meteo-idrologiche (periodo 2013/2019 con estensione all'anno 2021 – Fonte: Dipartimento della Protezione Civile-Presidenza del Consiglio dei Ministri).

La Commissione Europea, già nel 2013, ha adottato la "Strategia di adattamento ai cambiamenti climatici dell'Ue", al fine di aiutare i Paesi a pianificare le proprie attività in questo senso, e per rafforzare la resilienza ha previsto lo stanziamento di specifici fondi. Sono 23 i Paesi Ue, con l'aggiunta del Regno Unito, che hanno adottato un piano nazionale o settoriale di adattamento al clima e tra

questi non vi è l'Italia. Investire nell'adattamento climatico può generare notevoli vantaggi economici.

Tab. 1 Danni da evento meteo-idro distinti per regione

Regioni	A) Importo segnalato dalla Regione per la richiesta dello stato di emergenza	B) Ricognizione fabbisogni del Commissario Delegato	Totale (A + B)
Abruzzo	965.450.172,00	806.612.016,00	1.772.062.188,00
Basilicata	236.341.549,00	244.367.855,00	480.709.404,00
Calabria	817.148.572,00	159.492.853,00	976.641.425,00
Campania	694.974.803,00	1.113.073.128,00	1.808.047.931,00
Emilia R.	1.330.166.792,00	1.193.538.461,00	2.523.705.253,00
Friuli V. G.	0,00	5.159.704,00	5.159.704,00
Lazio	433.275.051,00	594.429.668,00	1.027.704.719,00
Liguria	854.012.427,00	920.854.442,00	1.774.866.869,00
Lombardia	302.628.922,00	177.280.106,00	479.909.028,00
Marche	860.972.715,00	624.083.280,00	1.485.055.995,00
Molise	295.814.185,00	117.096.644,00	412.910.829,00
Piemonte	977.622.905,00	290.097.845,00	1.267.720.750,00
Puglia	840.487.485,00	641.195.305,00	1.481.682.790,00
Sardegna	0,00	613.876.400,00	613.876.400,00
Sicilia	624.068.097,00	140.025.479,00	764.093.576,00
Toscana	927.143.080,00	692.217.440,00	1.619.360.520,00
Umbria	101.814.794,00	111.496.800,00	213.311.594,00
Valle d'Aosta	20.981.242,00	1.809.701,00	22.790.943,00
Veneto	785.036.640,00	789.001.047,00	1.574.037.687,00
Totale	11.067.939.431,00	9.235.708.174,00	20.303.647.605,00

Fonte: Dipartimento della Protezione Civile-Presidenza del Consiglio dei Ministri – periodo 2013-2019 con l'estensione all'anno 2021

L'Italia, si osserva nello studio, ha speso un'enorme quantità di soldi in questi decenni per rincorrere i danni provocati da alluvioni, piogge e frane, a fronte di poche risorse spese per la prevenzione. Di seguito si riporta una tabella nella quale sono riportate le somme investite per la realizzazione di progetti di prevenzione.

Come risulta evidente, l'aliquota largamente prevalente nel *mare magnum* dei danni da fenomenologie meteorologiche estreme è quella riconducibile alle precipitazioni piovose di grande intensità.

Nel seguito si procede, pertanto, ad una analisi del fattore pluviometrico estremo, in quanto è ad esso che sono ascrivibili le maggiori criticità territoriali ed i conseguenti maggiori danni finanziari, nonché il numero più elevato di vittime.

Tab. 2 Somme investite in progetti di prevenzione del rischio meteo-idro

Regioni	Spesa in prevenzione		Numero di progetti	
	Totale	%	Totale	%
Liguria	338.591.862,00	16,31	33	2,25
Toscana	198.397.800,00	9,56	113	7,70
Lombardia	188.726.946,00	9,09	66	4,50
Emilia Romagna	159.352.271,00	7,68	112	7,63
Sicilia	158.287.955,00	7,62	125	8,52
Veneto	151.933.863,00	7,32	40	2,73
Abruzzo	111.069.118,00	5,35	105	7,16
Piemonte	108.260.947,00	5,21	155	10,57
Campania	87.749.079,00	4,23	90	6,13
Sardegna	86.457.994,00	4,16	48	3,27
Puglia	83.827.798,00	4,04	97	6,61
Friuli V, Giulia	63.302.801,00	3,05	27	1,84
Marche	59.457.088,00	2,86	65	4,43
Molise	57.873.423,00	2,79	73	4,98
Lazio	54.494.309,00	2,62	59	4,02
Basilicata	51.975.729,00	2,50	132	9,00
Calabria	51.481.670,00	2,48	55	3,75
Umbria	31.733.519,00	1,53	33	2,25
Trentino A, Adige	26.676.900,00	1,34	29	1,98
Valle d'Aosta	5.476.668,00	0,26	10	0,68
Totale	2.076.127.740,00	100,00	1467	100,00

Fonte: ISPRA – Rapporto Rendis 2020 – periodo 2013-2019

7.3. Il rischio da fenomeni pluviometrici estremi: inquadramento dei processi atmosferici predisponenti

I fenomeni meteorologici a forte impatto sul territorio

L'Italia è una nazione che, per la sua particolare morfologia orografica, risulta particolarmente esposta alle fenomenologie alluvionali, sia ad insorgenza rapida (tipiche dei bacini di piccole dimensioni e forti pendenze medie, tipo quelli presenti in Liguria, in Campania, in Calabria e in Sicilia), sia quelli con onda di piena che si presenta con tempi di ritardo di molte ore o anche giorni per i bacini idrografici di maggiore estensione (bacino del Po, dell'Arno, del Tevere).

Le fenomenologie alluvionali, nel loro insieme, sono quelle che comportano il numero maggiore di vittime e i maggiori danni materiali, spesso di entità non va-

lutabile, come, per esempio, quelli causati dalla piena dell'Arno a Firenze nel novembre 1966.

In Italia, gli ultimi 20 anni sono stati caratterizzati da un incremento delle fenomenologie alluvionali ad insorgenza rapida, che hanno esteso la loro copertura spaziale a regioni che in passato erano solo occasionalmente coinvolte in questi fenomeni: la regione che negli ultimi anni ha osservato la maggiore escalation di eventi alluvionali è senz'altro la Sicilia, la cui parte orientale (Province di Messina e Catania) ha dovuto subire le conseguenze di eventi meteorici di estrema violenza, causati talvolta da sistemi depressionari con caratteristiche simili a quelle riscontrabili nei cicloni tropicali (TLC – Tropical Like Cyclone) o, più frequentemente, a Sistemi Convettivi a Mesoscala (MCS – Mesoscale Convective System) o a tempeste a "V" (V-SS – V-Shaped Storm).

I fenomeni temporaleschi

Gli eventi pluviometrici di maggiore intensità si manifestano, nella maggioranza dei casi, sotto forma di temporale.

Il temporale è una meteora atmosferica caratterizzata dall'associazione di precipitazioni di forte intensità (componente idrometeorica) ed attività elettrica atmosferica sotto forma di fulmini (componente elettrometeorica).

Esso è associato ai vigorosi moti ascensionali delle masse di aria calda ed umida presenti nei bassi strati. I temporali sono generati esclusivamente dai *Cumulonimbus* (CB), nubi a fortissimo sviluppo verticale: essi possono manifestarsi con geometria e caratteristiche diverse a seconda dello stadio di sviluppo e delle peculiari condizioni della struttura atmosferica. Possiamo elencare diverse specie:

- CB *calvus*: dai contorni netti, non sfilacciati, con sommità che li fa assomigliare ad un cavolfiore;
- CB *capillatus*: dalla sommità con contorni sfrangiati, cirriformi;
- CB *incus*: dalla tipica forma ad incudine; i *Cumulonimbus* nella fase di sviluppo completo assumono spesso questa forma che però, per essere apprezzata in modo distinto, deve essere osservata da grande distanza (almeno una cinquantina di km);
- CB *incus-capillatus*: i *Cumulonimbus* nella fase di piena maturità presentano spesso la contemporanea presenza delle due caratteristiche prima descritte.

I fenomeni temporaleschi sono la manifestazione tangibile di una concentrazione di energia in corrispondenza di volumi limitati di atmosfera e che, di conseguenza interessano porzioni altrettanto limitate della superficie terrestre.

Il concetto fisico è evidente: nell'atmosfera è presente energia diffusa, in parte misurabile direttamente (energia termica sensibile o calore), in parte desumibile dai valori dell'umidità presente sotto forma di vapor acqueo. Questa seconda aliquota di energia, di tipo latente, è quella responsabile dei fenomeni meteorologici più intensi che avvengono sulla superficie terrestre: gli uragani, i tornado, i temporali e, di conseguenza, le precipitazioni piovose estremamente intense che possono riversarsi al suolo in brevi intervalli di tempo.

L'acqua per passare dallo stato liquido allo stato gassoso (evaporazione) necessita di una grande quantità di energia, quella stessa energia che si "libera" quando il vapor acqueo torna allo stato liquido (condensazione). Una massa di aria molto calda e umida contiene grandi aliquote di energia latente ma, comunque, immediatamente disponibile per alimentare i processi termodinamici che portano allo sviluppo dei *Cumulonimbus*, l'unico genere di nubi in grado di generare i temporali, e in alcuni casi, i nubifragi.

I *Cumulonimbus* sono nubi grande sviluppo verticale: essi presentano la loro base a quote comprese tra i 1000 e i 1500 m mentre la sommità può spingersi fino ai limiti della troposfera e talvolta oltre, a quote, cioè, che alle medie latitudini sono di circa 12.000 m (Fig. 1).

Fig. 1 Cumulonembo ad incudine (*Cumulonimbus incus*): nube imponente (in secondo piano, illuminata dal Sole) che raggiunge i limiti della troposfera, allargandosi poi radialmente al di sotto del limite inferiore della fascia di inversione termica in quota



Fonte: Ns. elaborazione

In seno a tali nubi sono presenti delle correnti ascensionali (*updraft*) estremamente intense, con velocità che possono anche superare i 30 m/s. Tali velocità sono raggiunte proprio grazie alle masse di aria calda ed umida che alimentano dal basso l'ammasso nuvoloso, masse che nella loro salita (secondo il ramo ascendente di una cellula di moto convettivo) sono sospinte verso l'alto dalla spinta

di galleggiamento indotta dalla loro minore densità rispetto alle masse d'aria più fredda che delimitano lateralmente l'ingombro geometrico del *Cumulonimbus*.

Il sollevamento delle masse di aria calda, peraltro, porta ad un raffreddamento per decompressione adiabatica, sino al livello del punto di rugiada. A questo punto si ha il passaggio di stato da fase vapore a fase liquida.

Questo è un punto cruciale della dinamica di sviluppo della nube temporalesca: la condensazione, infatti, fa sì che si liberi in atmosfera il calore latente immagazzinato all'atto dell'evaporazione.

L'energia termica corrispondente è enorme e induce una accelerazione delle dinamiche di sviluppo del sistema temporalesco.

I fattori che portano allo sviluppo di un temporale sono gli stessi alla base della formazione di un *Cumulonimbus*:

- presenza di masse di aria calda e molto umida nei bassi strati;
- presenza di gradienti termici verticali moderati o forti.

A questi due fattori, che potremmo definire di base, possono aggiungersi altri fattori egualmente importanti:

- confluenza delle correnti aeree nei bassi strati secondo linee a sviluppo generalmente meridionale;
- presenza di notevoli gradienti verticali di velocità del vento (elevato windshear positivo in medio-alta troposfera);
- presenza di notevoli gradienti verticali della direzione del vento (elevato windshear di direzione in medio-bassa troposfera).

La coesistenza di tutti i fattori sopraelencati consente di affermare che siamo in presenza di rischio elevato di sviluppo di *Cumulonimbus* e, quindi, di temporali anche violenti.

7.4. La Scienza Meteorologica applicata alla mitigazione del rischio idrologico ed idrogeologico: il nowcasting e l'allarme idrogeologico immediato

La prevedibilità dei fenomeni temporaleschi di grande intensità

Negli ultimi anni è cresciuta la frequenza di fenomeni alluvionali ad insorgenza rapida, le cosiddette flash floods (alluvioni lampo), fenomeni idrologici che si sviluppano quando precipitazioni molto intense colpiscono bacini idrografici di piccola estensione e caratterizzati da forti pendenze superficiali.

In Italia le alluvioni lampo causano ogni anno molte vittime: da qui nasce l'esigenza di strutturare metodiche previsionali che si adattino alle caratteristiche di sviluppo dei fenomeni meteorologici brevi ed intensi alla base dei fenomeni idrologici di superficie a maggiore capacità di impatto.

La previsione di sviluppo delle formazioni temporalesche è, dal punto di vista probabilistico, un problema risolvibile in quanto ben noti sono i fattori strutturali atmosferici predisponenti a tale tipologia di fenomeni.

Questi fattori sono correlabili a determinate situazioni a scala sinottica, ben rappresentate dalle analisi e dalle elaborazioni dei modelli fisico-matematici di previsione meteorologica, in particolare dai Modelli ad Area Limitata (LAM). Tra di esse rivestono particolare importanza:

- le carte della distribuzione barometrica al suolo;
- le carte della temperatura potenziale al suolo;
- le carte degli Indici termodinamici LI (Lifted Index) e CAPE (Convective Available Potential Energy);
- le carte di rappresentazione della componente verticale del moto alla superficie isobarica di 700 hPa;
- le carte dei geopotenziali della superficie isobarica di 500 hPa, con indicazione delle temperature;
- le carte dei geopotenziali della superficie isobarica di 300 hPa, con andamento delle isotache.

Previsione dello sviluppo di fenomeni temporaleschi

Esiste una legge qualitativa che lega in maniera direttamente proporzionale:

- a. l'estensione A dell'area per la quale ha un fondamento ed una sostenibilità scientifica emettere una previsione meteo;
- b. il range temporale ΔT della previsione:

$$A = f(\Delta T)$$

In altri termini è possibile affermare che quanto più è distante la data alla quale si proietta la previsione meteo, tanto maggiore è l'estensione alla quale è possibile riferire la previsione stessa.

Nel rispetto della notazione sintetica sopra riportata è possibile elencare i seguenti casi.

Prevedibilità di fenomeni intensi a medio termine (3-6 giorni di distanza temporale)

È possibile prevedere la presenza di una situazione di instabilità atmosferica ma la notevole distanza temporale rende molto poco affidabile la stima dell'intensità e la localizzazione di dettaglio delle aree a massima probabilità di sviluppo di temporali. A tale distanza temporale, le immagini satellitari (rilevamenti nel campo del visibile e dell'infrarosso) non sono di alcuna utilità in quanto le figure bariche responsabili della instabilità possono ancora trovarsi a diverse centinaia o anche migliaia di km di distanza dal sito in esame oppure non essersi ancora sviluppate.

Prevedibilità di fenomeni intensi a breve termine (da 24 a 48 ore)

È possibile prevedere, con sufficiente attendibilità, il realizzarsi di una situazione di instabilità atmosferica e delimitare in un ambito spaziale più ristretto le zone a massimo rischio di fenomeni temporaleschi. A tale range di distanza temporale, in

particolare in corrispondenza dell'estremo inferiore (24 ore), le immagini da satellite possono evidenziare i segni della instabilità, con le cellule temporalesche in sviluppo in aree geografiche prossime a quella in esame.

Prevedibilità di fenomeni intensi a brevissimo termine (meno di 24 ore)

È possibile prevedere con elevata attendibilità il realizzarsi di una situazione di instabilità atmosferica in quanto la struttura della troposfera sul sito di osservazione sta già predisponendosi per raggiungere la configurazione termodinamica favorevole allo sviluppo dei temporali. Le immagini da satellite mettono quasi sempre in evidenza la presenza di cellule temporalesche attive nelle immediate adiacenze del sito e anche l'osservazione a vista dello stato del cielo può di sovente evidenziare la presenza di nubi a forte sviluppo verticale (*Cumululus congestus* o isolati *Cumulonimbus*).

Prevedibilità di fenomeni intensi in regime di nowcasting (poche ore di anticipo)

La situazione di instabilità è sul luogo di osservazione. Il satellite è oramai l'unico mezzo per monitorare la situazione meteorologica ed individuare la presenza e l'iter evolutivo dei *Cumulonimbus* presenti. Ad integrazione del quadro informativo fornito dalle immagini satellitari è opportuno analizzare:

- il flusso di immagini prodotte dai radar meteorologici, in grado di rilevare le precipitazioni stimandone l'intensità istantanea;
- l'andamento dei parametri meteorologici al suolo rilevati da centraline presenti nelle immediate adiacenze (temperatura, direzione del vento, pressione, umidità);
- le mappe di distribuzione delle scariche elettriche.

Ma anche in questa fase, con la cellula temporalesca attiva, non è possibile prevedere quanti mm saranno caduti sul luogo di osservazione a fenomeno esaurito. Si riassume quanto detto nella tabella seguente:

Tab. 3 Valutazione della utilità previsionale specifica dei vari supporti informativi

	$\Delta T > 6 \text{ gg}$	$6 \text{ gg} < \Delta T < 3 \text{ gg}$	$2 \text{ gg} < \Delta T < 1 \text{ g}$	$\Delta T < 24 \text{ h}$	$\Delta T < 3 \text{ h}$
Modelli previsionali	bassa	media	alta	alta	bassa
Immagini satellitari	nulla	bassa	media	alta	altissima
Immagini radar	nulla	nulla	nulla	bassa	altissima
Immagini scariche elettr.	nulla	nulla	bassa	alta	altissima
Osservazione del cielo	nulla	nulla	bassa	media	alta
Analisi dei pluviogrammi	na	na	na	na	altissima

na = non applicabile

nulla = di nessuna utilità

Fonte: Ns. elaborazione

Interpretazione dei pluviogrammi per la proiezione previsionale degli accumuli precipitativi

L'unico mezzo per poter effettuare proiezioni sui quantitativi che risulteranno essere caduti al suolo a fenomeno temporalesco esaurito è quello della analisi in continuo dei dati misurati da un pluviometro, monitorando, al tempo stesso, le dinamiche evolutive della cellula temporalesca tramite immagini satellitari e radar.

I pluviometri di recente generazione hanno la possibilità di fornire il dato di accumulo in tempo reale, con intervalli di campionamento anche di solo 1 minuto. Ciò rende possibile la valutazione non solo dell'accumulo complessivo ma anche del parametro "Rain Rate" o "Intensità istantanea di precipitazione".

Risulta quindi possibile una analisi approfondita delle modalità di sviluppo dell'evento pluviometrico, con immediata intercettazione di eventuali accumuli significativi in relazione, per esempio, a problematiche di Protezione Civile.

I fenomeni temporaleschi avvettivi

Considerata la pericolosità che questi fenomeni possono assumere, dovuta anche alla rapidità del loro sviluppo o arrivo su luogo di osservazione, elenchiamo quelli che sono i segni che ci consentono di anticiparne l'occorrenza.

I temporali frontali, connessi cioè al transito sul luogo di osservazione di un fronte freddo o di una linea di instabilità, sono di solito facilmente individuabili: il cielo si presenta irregolarmente nuvoloso per nubi cumuliformi a medio o forte sviluppo verticale (*Cumulus congestus*) che si muovono generalmente da SO a NE.

Nell'imminenza dell'arrivo del temporale, ad O il cielo tende a coprirsi di nubi che sembrano dei densi *Cirrus* ma che, a differenza di questi, presentano uno spessore che cresce molto rapidamente fino a che le nubi diventano di un colore grigio che non lascia distinguere il disco del Sole.

In questa fase iniziano a notarsi nubi cumuliformi molto sviluppate verticalmente che si muovono lentamente e le cui sommità vanno ad immergersi nel denso strato di nubi alte (Fig. 2).

Queste nubi cumuliformi hanno spesso due componenti di moto: nella parte inferiore si muovono da SO verso NE mentre alle quote superiori si mettono in fase con le nubi alte che provengono da O.

A questo punto la parte bassa del cielo, ad O, si scurisce con le nubi ai livelli inferiori che, pur provenendo da meridione, tendono ad invadere il cielo da O verso E. Il vento al suolo spesso va incontro al temporale spirando da SE, andando praticamente ad alimentare, con il suo contenuto di umidità, l'ammasso di nubi temporalesche che avanza.

Le precipitazioni, a carattere di rovescio e talvolta accompagnate da grandine, iniziano a scrosciare quando sul luogo di osservazione transita la nube a mensola (*shelf cloud*).

Si odono i primi tuoni e nel giro di pochi minuti il temporale si trova sul luogo di osservazione, rilasciando il suo carico di pioggia, grandine e forti colpi di vento.

Fig. 2 Un temporale a “supercella” avanza da O poco dopo il tramonto. Nella parte alta della foto sono visibili le nubi dall’aspetto cirriforme, ancora illuminate dal Sole, che sono in realtà il margine dell’incudine del Cumulonimbus. Nella parte inferiore sono presenti le nubi che, ruotando intorno alla base del Cumulonimbus, con un moto confluyente, vanno ad alimentare la dinamica temporalesca (inflow). In basso a destra si nota l’area delle forti precipitazioni



Fonte: William Demasi – Emilia Romagna Meteo

I temporali termo-convettivi locali

I temporali sono dovuti al sollevamento di masse di aria calda e umida che dagli strati inferiori della troposfera si sollevano sino a raggiungere la tropopausa.

Le dinamiche termo-convettive occupano, pertanto, tutto lo spessore della troposfera, sollevando le masse d’aria per oltre 10 km; tale spessore è massimo durante l’estate ed è quindi in questa stagione, anche a motivo del fortissimo riscaldamento della superficie terrestre, che i temporali raggiungono l’intensità massima.

La sequenza di immagini riportata di seguito, mostra il rapido sviluppo di un temporale sull’area Vesuviana, così come osservato da Castellammare di Stabia (NA). Nella prima foto si notano sullo sfondo incudini in avanzato stadio evolutivo, mentre in primo piano è presente una torre cumuliforme in fase di rapido sviluppo verticale. Nella seconda foto la nube torreggiante in primo piano ha formato una incudine ad aspetto cirriforme, che si è distesa verso SO, testimoniando la presenza di correnti nord-orientali in quota; sulla destra della foto si nota la formazione di nuovi *Cumulonimbus*.

Fig. 3 Sequenza tipica che mostra l'approssimarsi da N di un temporale termoconvettivo, in sviluppo nelle prime ore pomeridiane di una giornata di metà giugno. Nell'ultima foto si nota il Vesuvio interessato da un forte acquazzone



Fonte: www.campanialive.it

Nella terza foto i singoli ammassi cumuliformi si fondono tra di loro, organizzandosi in una struttura temporalesca compatta, con le precipitazioni che compaiono sulla parte destra della foto.

Nella quarta foto il temporale avvolge l'area vesuviana, con abbondanti precipitazioni: tra la prima e l'ultima foto sono trascorsi circa 60 minuti (Fig. 3).

7.5. La protezione della popolazione dagli eventi alluvionali a rapida insorgenza (Flash flood)

I cittadini delle aree abitate di fondovalle e allo sbocco di piccoli bacini idrografici superficiali, in aree periodicamente interessate dal transito dei *Cumulonimbus*, sono esposti ad un livello di rischio molto elevato per la possibilità di eventi piovosi di rilevante intensità. La risposta del territorio può essere tale da indurre criticità idrogeologiche anche gravi, che possono portare notevoli danni alle economie locali e, nei casi più gravi, alla perdita di vite umane.

I tragici eventi che si verificano in concomitanza dei nubifragi di maggiore intensità, dimostrano che i rappresentanti delle pubbliche istituzioni, sui quali ricade l'onere di tutelare e difendere la vita dei cittadini, non possiedono ancora una cultura di Protezione Civile matura in misura tale da riuscire ad organizzare una strategia efficace di difesa dalle conseguenze dei fenomeni meteorici estremi.

Si deve partire dal presupposto che risulta praticamente impossibile mettere in sicurezza, in tempi rapidi, tutte le aree urbane ed antropizzate esposte al rischio su base idrogeologica.

Molti problemi sono infatti strutturalmente correlati al sito di realizzazione dell'intervento antropico e quindi, anche impedendo nuovi interventi in aree pericolose, non si risolverebbe il problema degli insediamenti già esistenti. Pragmaticamente, si può affermare che l'obiettivo che ci si deve prefiggere, e che si può conseguire nell'immediato, è quello di mitigare le conseguenze dei nubifragi e, soprattutto, quello di salvare le vite umane.

Questo obiettivo di grande rilevanza sociale lo si può conseguire attraverso una nuova organizzazione, implementando un sistema strumentale in grado di fare scattare un allarme idrogeologico immediato (*early warning*) nelle aree urbane e nei territori interessati da infrastrutture di importanza strategica, non appena i vari pluviometri distribuiti sul territorio abbiano iniziato a registrare i valori di pioggia eccezionali tipicamente associabile al transito dei *Cumulonimbus*.

I bacini stretti e lunghi di dimensioni modeste, che incombono su aree abitate attraversate da alvei-strada, quando sono interessati da eventi piovosi di rilevante entità, possono alimentare dapprima flussi idrici e fangosi e poi detritici tali da trasportare nell'area urbana, complessivamente alla fine dell'evento, volumi enormi di detriti.

La portata massima che caratterizza questi flussi eccezionali non riesce, di solito, ad essere smaltita dagli alvei, spesso coperti nei tratti terminali urbani, a pendenza più modesta. Essi vengono pertanto sistematicamente intasati da autoveicoli, tronchi di alberi d'alto fusto e detriti anche di grandi dimensioni.

Nella previsione dei fenomeni di "Alluvione lampo" (*Flash flood*) risulta di fondamentale importanza la definizione delle dimensioni dei bacini idrografici superficiali: infatti, come visto, il livello di rischio cresce al diminuire delle dimensioni del bacino in esame.

Questa legge di inversa proporzionalità si poggia sulla evidenza che nello studio degli eventi pluviometrici di rilevante entità, le massime intensità istantanee di pioggia sono relative ai fenomeni di breve durata.

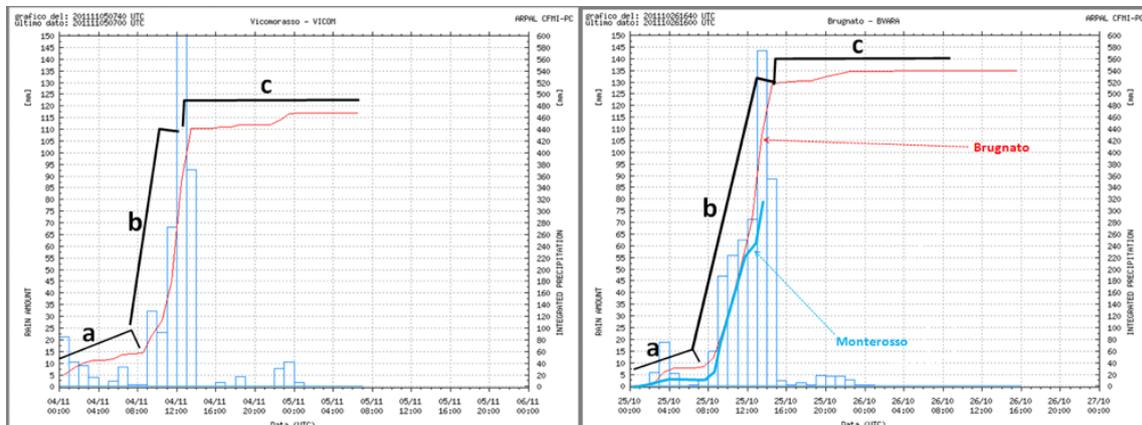
È quindi in tali contesti che è necessario realizzare sistemi di monitoraggio pluviometrico che possano "intercettare" in tempo reale l'evento pluviometrico avverso, caratterizzato da molte decine di millimetri di pioggia in un'ora, con durata complessiva anche di alcune ore, e che consentano di emettere un "Allarme Idrologico Immediato".

Tali allarmi precoci offrono alle popolazioni coinvolte la possibilità di raggiungere luoghi sicuri, esterni ai prevedibili percorsi delle acque e dei detriti di una alluvione lampo o di una colata detritica.

La ricerca ha messo in evidenza che le piogge tipo nubifragio rilasciate dai *Cumulonimbus*, sono caratterizzate da un pluviogramma dalla tipica morfologia, facilmente individuabile già in fase di registrazione dell'evento piovoso (Fig. 4).

Si distinguono nettamente tre tratti: un tratto "a" che rappresenta la registrazione di una pioggia caratterizzata da pochi millimetri all'ora, praticamente una pioggia "normale", un tratto "b" che rappresenta una verticalizzazione della curva pluviometrica che corrisponde alla pioggia tipo nubifragio rilasciata da *Cumulonimbus*, con diverse decine di millimetri ogni ora, ed infine un tratto "c" corrispondente ad una pioggia normale, dopo che è terminato il nubifragio. Nella quasi totalità dei casi, le registrazioni pluviometriche di eventi tipo nubifragio è possibile individuare questa tipica morfologia della curva.

Fig. 4 A sinistra, l'evento piovoso del 4 novembre 2011 registrato a Vicom-rasso, nei pressi del bacino del Rio Fereggiano; a destra le registrazioni del 25 ottobre 2011 a Brugnato e Monterosso (linea azzurra)



Fonte: Fortelli, A., Ortolani, F., & Pagliuca, S.

Un pluviometro che sia in grado di registrare la pioggia precipitata al suolo ogni due-tre minuti consente agevolmente, dopo pochi minuti, di individuare l'inizio del nubifragio la cui durata può variare da alcune decine di minuti a qualche ora.

Trascorsi pochi minuti dalla verticalizzazione del pluviogramma è possibile lanciare l'allarme idrogeologico allo scopo di mettere tempestivamente al sicuro i cittadini. Tale risultato lo si ottiene attraverso l'applicazione del Piano di Protezione Civile Locale che si basa, *in primis*, sulla corretta individuazione delle zone che possono essere interessate dagli eventuali flussi costituiti da onde di piena idrica e/o da flussi detritici.

Il sistema strumentale sul quale si basa l'attivazione dell'Allarme Idrogeologico Immediato deve essere coperto da una fornitura elettrica privilegiata, mediante gruppi elettrogeni e batterie/gruppi di continuità di adeguata potenza e durata, al fine di evitare che durante i nubifragi possa interrompersi il funzionamento delle strumentazioni.

L'attuale stato di conoscenze e di operatività derivante dalla presenza di una rete di monitoraggio pluviometrico consente di:

- individuare le curve pluviometriche riconducibili ad eventi piovosi tipo nubifragio;
- individuare in tempo reale la verticalizzazione della curva registrata da un pluviometro ad elevata frequenza di campionamento;
- stabilire l'intervallo temporale dall'inizio della verticalizzazione della curva pluviometrica decorso il quale è possibile dichiarare che si è in presenza di un evento pluviometrico avente potenzialità di rilevante impatto sul territorio, in termini di innesco di onde di piena e flussi detritici;
- ricostruire, nelle aree devastate da fenomeni idrogeologici conseguenti ad eventi piovosi tipo nubifragio, dopo quanti minuti inizia il coinvolgimento delle diverse aree antropizzate ed urbanizzate nell'onda di piena idrica o da eventuali flussi detritici;
- individuare linee guida per la redazione preventiva di piani di protezione civile locali da attuare, appena lanciato l'allarme idrogeologico immediato, nelle zone che possono essere interessate da onde di piena e flussi detritici;

- elaborare linee guida per la realizzazione di un sistema di allarme idrogeologico immediato e valutarne i relativi costi.

Allo stato attuale, i sistemi di monitoraggio meteorologici satellitari e radar consentono, con un anticipo di alcune ore (*nowcasting*) di individuare le aree entro le quali è verosimile ipotizzare l'innescò e lo sviluppo delle cellule temporalesche.

In questa fase, quando le precipitazioni non sono ancora iniziate o le stesse sono rappresentate da una curva pluviometrica sub orizzontale, può scattare lo stato di preallarme; i *Cumulonimbus* rilasciano la pioggia secondo fasce di territorio ampie da circa 5 a circa 10 km, per cui l'area interessata dall'evento piovoso può essere individuata esattamente solo con le registrazioni pluviometriche al suolo da parte di una fitta rete di pluviometri ubicati strategicamente in relazione alle caratteristiche morfologiche dei bacini idrografici.

Il Sistema di Allarme Idrogeologico deve essere attuato a livello comunale e di bacino idrografico in quanto il percorso dei *Cumulonimbus* può avvenire longitudinalmente o trasversalmente alla direzione di sviluppo dei bacini idrografici.

7.6. Conclusioni

Le criticità ambientali generate dai fenomeni meteo-idrologici estremi sono un aspetto peculiare della quasi totalità del territorio italiano: esse si traducono in un pesante carico finanziario sulla comunità, senza voler prendere in considerazione coloro che, purtroppo, ogni anno entrano nella tragica conta delle vittime.

La studio dei fattori fisici scatenanti e una approfondita analisi statistica in termini di dislocazione spaziale (mappatura geografica) e frequenza di occorrenza (tempo di ritorno), possono fornire elementi estremamente utili per poter strutturare più efficaci strategie di prevenzione, protezione (attiva e passiva) e mitigazione delle conseguenze, consentendo in maniera efficace, e da subito, di perseguire una più efficace salvaguardia della vita umana.

La figura del meteorologo può e deve essere parte integrante di questo complessivo scenario di ricerca in quanto solo essa dispone del bagaglio culturale che consente di poter interpretare ed inquadrare correttamente le fenomenologie atmosferiche estreme, sia sotto l'aspetto previsionale che dal punto di vista dell'analisi a posteriori dei fenomeni estremi.

Bibliografia

- Esposito, L., Fortelli, A., & Pasculli, A. (2015). *Eventi meteorologici e stabilità del territorio*. Aracne Editrice.
- Fortelli, A. (2021). *Elementi di meteorologia per la progettazione green*. FedOA - Federico II University Press.
- Fortelli, A., Ortolani, F., & Pagliuca, S. (2014). *Il sistema di allarme idrogeologico immediato per la mitigazione del rischio prodotto da fenomeni meteorologici intensi nelle aree urbane*. L'Ambiente Antropico.
- Fortelli, A., Scafetta, N., & Mazzarella, A. (2016). Local warming in historical center of Naples. In *International Journal of Heat and Technology*, 34(2), pp. 569-572.

Fortelli, A., Scafetta, N., & Mazzarella, A. (2019). *Nowcasting and real-time monitoring of heavy rainfall events inducing flash-floods: an application to Phlegraean area (Central-Southern Italy)*. *Nat Hazards*.

Sitografia

<https://www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/rapporti/rendis-2020.pdf>.
<https://www.protezionecivile.gov.it/it/dipartimento/amministrazione-trasparente/interventi-straordinari-e-di-emergenza/emergenze-il-rischio-meteo-idro>.

La informiamo, infine, che i contenuti testuali, multimediali e i dati aggregati sul sito **www.protezionecivile.gov.it** sono tutelati dalla licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0). Fanno eccezione i testi pubblicati in formato integrale nella sezione “Provvedimenti”, di cui il Dipartimento della Protezione Civile non è né proprietario, né titolare, e altri contenuti tutelati da specifiche licenze.