

# TEMPORALI, FULMINI E GRANDINE

**Gianni Comini**

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

*gianni.comini@cism.it*

12 ottobre 2023

## 1 Fenomeni atmosferici e nubi

Nell'Atlante Internazionale delle Nubi, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO - World Meteorological Organization) definisce il temporale come “fenomeno atmosferico caratterizzato da uno o più fulmini, ovvero da scariche elettriche improvvise accompagnate da lampi di luce e tuoni”. In base a tale definizione, in un temporale la pioggia potrebbe anche mancare (sebbene la WMO si affretti ad aggiungere che, il più delle volte, i temporali portano anche precipitazioni sotto forma di pioggia e, occasionalmente, grandine, nevischio e particelle di ghiaccio).

Una condizione necessaria per la generazione dei temporali è la presenza di cumulonembi, ovvero di nubi a forte sviluppo verticale del tipo schematizzato nella Figura 1. Come si vedrà meglio nel seguito, il ciclo di vita di un cumulonembo comprende tre fasi: la prima fase è la formazione di un “cumulo”, la seconda fase è la “maturazione”, ovvero la trasformazione del cumulo in cumulonembo, e la terza fase è la “dissoluzione”, del cumulonembo. L'intero ciclo dura dai 30 ai 45 minuti ed è caratterizzato da forti precipitazioni durante la sola seconda fase, mentre la prima fase è sostanzialmente priva di precipitazioni e la terza fase comporta precipitazioni alquanto moderate.

Alcuni temporali, definiti “monocella”, si identificano con il ciclo di vita di un solo cumulonembo che staziona al di sopra di una singola area di dimensioni limitate. Anche se i “temporali di calore estivi” sono un esempio abbastanza frequente di temporali monocella va detto che, nella maggior parte dei casi, i temporali sono “multicella”, ovvero sono costituiti da gruppi o linee di celle in movimento che, uno dopo l'altro, attraversano le diverse fasi del loro ciclo di vita dando origine a sequenze di fenomeni atmosferici. Spesso, inoltre, si hanno sistemi temporaleschi di dimensioni imponenti costituiti da numerosi gruppi di multicelle che insistono sulla stessa area vasta, o da più linee di multicelle in rapido movimento che attraversano ampi territori. Infine, talvolta (anche se, fortunatamente, non troppo spesso) ci si trova di fronte ad una cella singola ma di diametro molto grande (supercella) che è in grado di autoalimentarsi e di spostarsi “a tappe” su distanze molto lunghe, con soste intermedie su aree che vengono seriamente danneggiate.

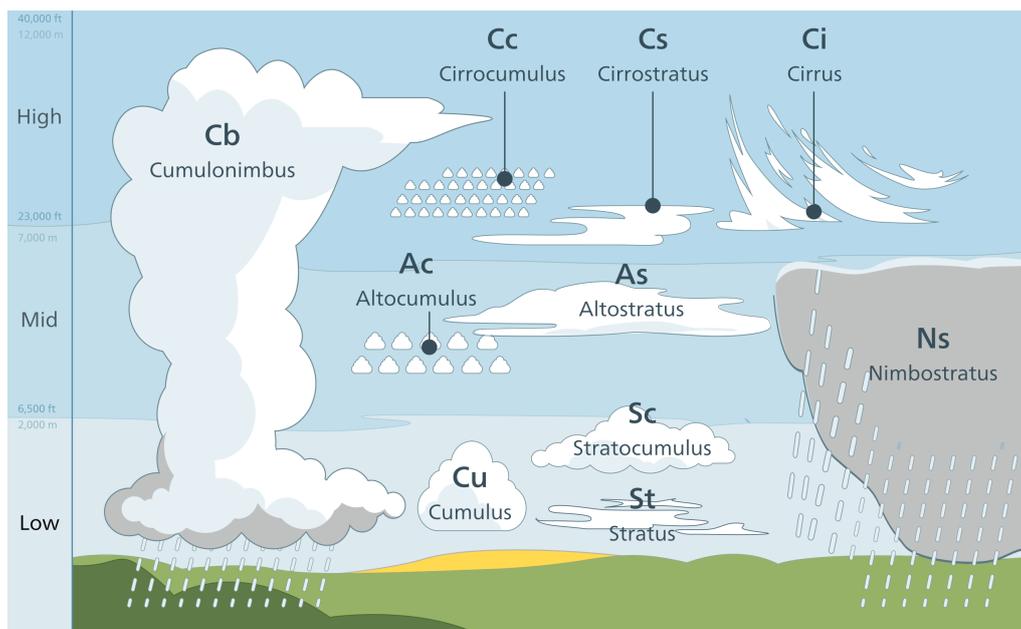


Figura 1: Principali tipi di nubi identificati dalle sigle internazionali a due lettere e raggruppati per altezza e forma. Il cumulonembo Cb è il primo a sinistra [Wikipedia].

Il “rischio” rappresentato dalle diverse categorie di temporali dipende da numero, intensità e tipologia dei fenomeni atmosferici pericolosi che li accompagnano. Da questo punto di vista, meteorologi e tecnici della protezione civile sono concordi nell’identificare come fattori di rischio particolarmente importanti, per le persone: un gran numero di fulmini nell’unità di tempo, e per le cose: venti discendenti forti, precipitazioni liquide intense e chicchi di grandine con dimensioni superiori al centimetro. Come vedremo, le probabilità del materializzarsi di tutti questi fattori di rischio crescono con le dimensioni dei sistemi temporaleschi e, ovviamente, con il numero dei cumulonembi.

Ad esempio, il numero dei fulmini generati cresce con l’altezza dei cumulonembi perché un ampio spazio verticale consente una stratificazione spinta delle particelle in sospensione, con le particelle di ghiaccio più piccole e leggere (portatrici di cariche negative) concentrate nella parte alta, ed i più pesanti chicchi di grandine e gocce di pioggia (portatori di cariche positive) accumulati nella parte bassa. In questo modo, si creano quelle differenze di potenziale elettrico, sia all’interno delle nubi sia tra nubi e suolo, che sono la premessa dei fulmini intesi come scariche elettriche violente e improvvise volte a ristabilire l’equipotenzialità.

Analogamente, l’altezza dei cumulonembi gioca un ruolo importantissimo nella generazione della grandine, in quanto consente alle particelle di ghiaccio di muoversi agevolmente all’interno delle nubi. Se poi le correnti convettive ascendenti (anch’esse correlate all’altezza) sono forti abbastanza da mantenere la grandine in sospensione per tempi sufficientemente lunghi, si creano le condizioni ideali per l’accrescimento dei chicchi durante i numerosissimi processi di coalescenza che consentono l’incorporazione di particelle liquide e solide più piccole.

## 1.1 Sviluppo di un cumulonembo

Come si è detto, i cumulonembi sono gli elementi costitutivi di tutti i temporali. Per lo sviluppo di un cumulonembo, devono essere soddisfatte tre condizioni:

- nelle vicinanze del suolo l'aria deve essere abbastanza calda e umida affinché, salendo in quota, il vapore in essa contenuto possa condensare (al raggiungimento della temperatura di rugiada) generando sia la quantità di goccioline necessaria a formare la parte bassa della nube, sia la quantità di goccioline in eccesso che (al raggiungimento dello zero termico) possa ghiacciare formando la parte alta della nube;
- nell'atmosfera, la stratificazione delle temperature deve essere tale da dare luogo ad una configurazione "potenzialmente instabile", ovvero tale da consentire la risalita per convezione naturale di grandi masse d'aria;
- infine, questa instabilità "potenziale" deve poter diventare "reale" grazie ad qualche meccanismo di innesco del processo di risalita.

Per quanto riguarda l'aria umida, si può ricordare che:

- la densità diminuisce considerevolmente all'aumentare della temperatura e del contenuto di vapore (in quanto, a parità di temperatura, il vapore d'acqua è meno denso dell'aria secca);
- la capacità dell'aria di contenere vapore aumenta con la temperatura variando tra lo 0,1% a  $-20^{\circ}\text{C}$  e il 5% a  $40^{\circ}\text{C}$ ;
- il contenuto di vapore nell'aria è misurato dalla "umidità specifica", espressa in chilogrammi di vapore per chilogrammo di aria secca;
- nell'atmosfera l'umidità specifica massima varia tra 1 g a  $-20^{\circ}\text{C}$  circa e 50 g a  $40^{\circ}\text{C}$  circa (ed, infatti, è esperienza comune che l'aria calda asciughi la biancheria meglio dell'aria fredda in quanto è in grado di asportare più vapore per unità di massa d'aria);
- nella troposfera, la temperatura diminuisce con la quota e, di conseguenza, con la quota diminuisce anche l'umidità specifica massima fino a quando, raggiunta la "temperatura di rugiada", il vapore inizia a condensare (la "temperatura di rugiada" è così chiamata perché è la temperatura raggiunta dal suolo nelle notti estive quando, sul suolo stesso, si iniziano a vedere le prime goccioline);
- l'umidità relativa corrispondente al punto di rugiada è necessariamente pari al 100% (dal momento che l'umidità relativa esprime il rapporto percentuale tra la quantità di vapore presente e la quantità massima contenibile nell'aria ad una certa temperatura).

Per quanto riguarda le modalità di risalita delle masse d'aria, si può dire che:

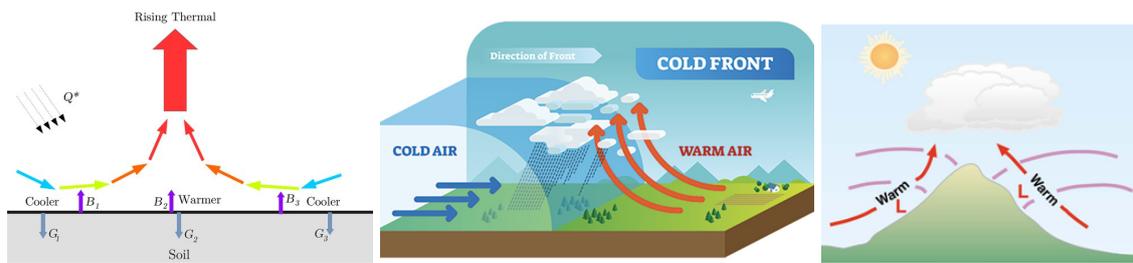


Figura 2: Possibili inneschi di correnti ascendenti. A sinistra: convezione naturale dovuta a riscaldamento differenziale del suolo; al centro arrivo di un fronte freddo e a destra venti termici [Public Domain].

- in fase di risalita, una massa d'aria si espande raffreddandosi perché la sua pressione si equilibra istantaneamente con la pressione dell'atmosfera adiacente, ma lo scambio termico con le masse d'aria vicine è trascurabile;
- in tale situazione, e in assenza di condensazione del vapore, la massa d'aria in fase di risalita subisce un raffreddamento definito “adiabatico secco” (cioè senza scambio termico e senza condensazione) pari a circa  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  per chilometro (e, di conseguenza, continua certamente a risalire se la temperatura atmosferica diminuisce più di  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ );
- poiché il calore latente di condensazione viene fornito alla stessa massa d'aria che sale, quando inizia la condensazione il gradiente di raffreddamento diminuisce da “adiabatico secco” ad “adiabatico saturo” (passando dai  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  nella bassa troposfera in cui il processo è adiabatico senza condensazione, ai  $6\text{-}7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  nella media troposfera in cui il processo è ancora adiabatico ma si ha condensazione) ;
- evidentemente, l'effetto complessivo dell'attenuazione del calo termico in presenza di condensazione del vapore, è quello di favorire la risalita convettiva delle masse d'aria;
- analogamente, è favorevole alla risalita convettiva delle masse d'aria, anche l'attenuazione del calo termico dovuta alla fornitura del calore latente di congelamento delle goccioline liquide (al di sopra della quota di zero termico).

Per meglio chiarire il concetto di “instabilità potenziale” è opportuno precisare che:

- una massa d'aria al suolo ha la stessa temperatura dell'aria atmosferica vicina e, trascurando gli effetti del secondo ordine dovuti all'umidità, si può dire che resti ferma senza l'intervento di un meccanismo di innesco della risalita in grado di portare la massa d'aria ad una quota alla quale l'aria atmosferica vicina si trovi a temperature minori (si ricordi che un metodo per far salire le mongolfiere è quello di scaldare con bruciatori l'aria di riempimento);
- il meccanismo più semplice di innesco della convezione naturale è quello schematizzato nella Figura 2 a sinistra, dove si ha un riscaldamento differenziale del suolo

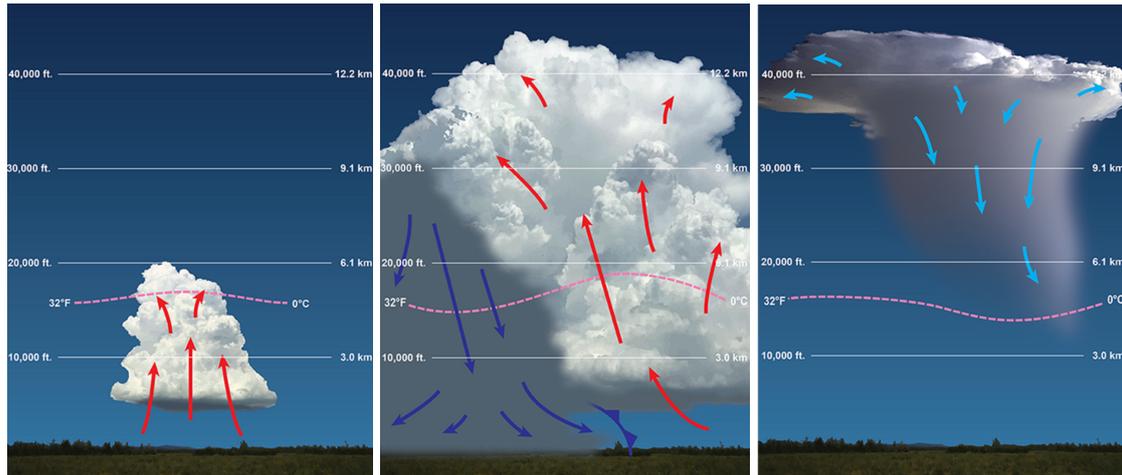


Figura 3: Ciclo di vita di un cumulonembo nel contesto di un temporale di calore estivo a cella singola: sviluppo (a sinistra); maturazione (al centro) e dissolvimento (a destra) [NOAA].

in presenza, ad esempio, di coefficienti diversi di assorbimento della radiazione solare (asfalto o cemento nelle zone più calde e superfici erbose o foreste nelle zone più fredde);

- nelle pianure, un altro meccanismo può essere la spinta alla risalita fornita dall'arrivo di un fronte freddo che, come schematizzato nella Figura 2 al centro, si insinua, sollevandola, al di sotto della massa d'aria calda e umida;
- in montagna, l'innesco è fornito spesso da venti termici come la brezza di valle, schematizzata nella Figura 2 a destra, in quanto tali venti risalgono i rilievi durante il giorno portando aria calda e umida in quota.

## 2 Ciclo di vita di un temporale monocella

La cella singola è la forma più semplice di temporale durante il quale un solo cumulonembo attraversa i tre stadi del ciclo di vita: sviluppo, maturazione e dissolvimento senza generare altre celle. Per concretezza, il temporale monocella può essere descritto con riferimento ai “temporali di calore” estivi generati in pianura in presenza di aria molto calda e umida al suolo, ed innescati dalla convezione naturale dovuta al riscaldamento differenziale del suolo stesso.

La fase di sviluppo di un temporale di calore è schematizzata nella Figura 3 a sinistra nella quale la risalita dell'aria calda e umida (indicata con le frecce rosse) resta invisibile fino alla quota in cui viene raggiunta la temperatura di rugiada (un chilometro e mezzo circa nella figura). Da questa quota in su, il vapore condensa e le goccioline d'acqua si manifestano sotto forma di una nube “a cavolfiore” in rapida crescita. Quando la sommità della nube arriva allo zero termico (segnato in figura da una linea tratteggiata posta alla quota di quattro chilometri e mezzo circa) la fase di sviluppo del “cumulo” può consi-

derarsi terminata perché, al di sopra dello zero termico, le goccioline liquide iniziano a congelarsi e la parte superiore della nube comincia a formarsi.

Se, come nel caso in cui ci poniamo, l'atmosfera è sufficientemente instabile, la crescita verticale della nube prosegue rapidamente con una fase di maturazione durante la quale il "cumulo" della Figura 3 a sinistra diventa un "cumulonembo" del tipo schematizzato nella Figura 3 al centro. Tuttavia, va notato che la crescita del cumulonembo non supera i limiti della troposfera se non per brevi tratti nei quali viene sfruttata l'energia cinetica accumulata dalle correnti ascensionali perché, nella stratosfera, la temperatura cresce con la quota creando una situazione di inversione termica.

La fase di cumulonembo maturo è quella che meglio caratterizza il temporale. Infatti, durante lo sviluppo del cumulo manca il tempo per avere precipitazioni significative e, in aggiunta, le correnti ascendenti sono in grado di mantenere in sospensione le gocce di pioggia ed i cristalli di ghiaccio appena formati. Nei cumulonembi maturi, invece, vi sono venti ascensionali forti e turbolenti oltre a spazi che consentono molteplici percorsi di galleggiamento durante i quali gocce e cristalli di ghiaccio possono crescere attraverso una serie di processi di coalescenza. In questo modo, però, gocce e cristalli si appesantiscono al punto da non poter più essere sostenuti dalle correnti ascendenti e, di conseguenza, precipitano trascinando l'aria circostante. Vengono così originate correnti fredde discendenti (indicate dalle frecce blu nella figura) che possono essere anche molto intense. Infatti, nella zona delle precipitazioni al suolo si creano fronti freddi del tipo di quello indicato nella Figura 3 al centro (con i caratteristici triangoli previsti dalla simbologia internazionale).

L'ultima fase del ciclo di vita di un temporale monocella è quella del dissolvimento, schematizzata nella Figura 3 a destra, nella quale si ha una vera e propria autodistruzione del cumulonembo. Infatti, le correnti fredde discendenti, portatrici delle precipitazioni, tendono progressivamente ad occupare tutta l'area trasversale disponibile e così ostacolano le correnti ascendenti calde e umide. Pertanto, il temporale taglia da solo le sue fonti di alimentazione, facendo cessare rapidamente le precipitazioni. Infatti l'intero ciclo di un cumulonembo, ovvero di un temporale monocella, dura da 30 a 45 minuti soltanto.

### **3 Temporali multicella e rigenerazione**

La maggior parte dei sistemi temporaleschi appartiene alla categoria dei temporali multicella. In essi, la rigenerazione continua di nuove celle convettive prolunga la durata del temporale da meno di un'ora (durata tipica di un temporale monocella) a diverse ore. Per quanto riguarda le tipologie di temporali multicella, a seconda di come le celle si organizzano si usa distinguere tra:

- singolo grappolo (cluster) di celle che si muove come una sola unità lungo una linea legata alla direzione del vento in quota;
- linea di celle che si sposta come una singola unità in direzione trasversale al moto del fronte freddo da cui deriva (ed è definita "linea dei groppi" dalla Treccani, mentre è chiamata "squall line" in inglese);
- Sistemi Convettivi detti a Mesoscala (in inglese MCS ovvero Mesoscale Convective Systems) in quanto hanno dimensioni dell'ordine di un centinaio di chilometri, e

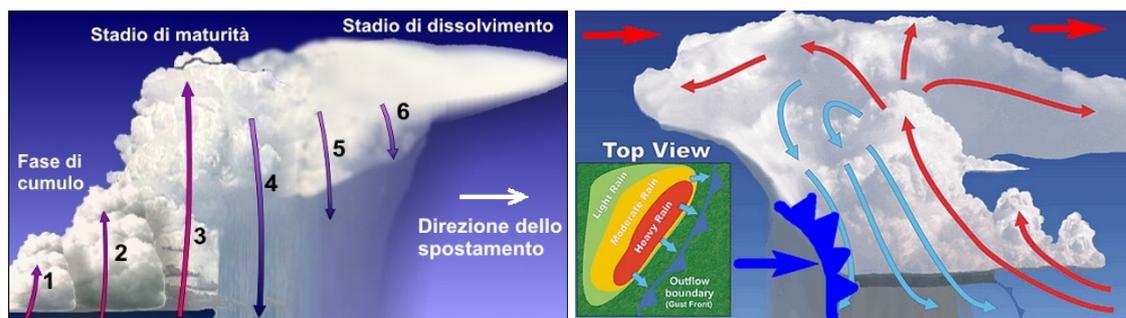


Figura 4: Sezioni trasversali di un grappolo di celle a sinistra e di una linea di celle a destra [NOAA, modificata].

sono necessariamente costituiti da numerosi grappoli di celle che insistono su una stessa area o da più linee di celle ravvicinate.

Prima di procedere con le descrizioni delle tipologie, tuttavia, va ribadito che il processo di rigenerazione è il tratto distintivo di tutti i sistemi temporaleschi a multicella e, come tale, sarà descritto in dettaglio nel seguito con riferimento alle due geometrie più semplici create dalla rigenerazione: i singoli grappoli di celle e le singole linee di celle.

### 3.1 Grappoli e linee di celle

Come si è detto, i grappoli di celle schematizzati in sezione trasversale nella Figura 4 a sinistra, e le linee di celle schematizzate in sezione trasversale nella Figura 4 a destra, sono strutture che si muovono come singole unità. In essi ogni cella si trova in un differente stadio di sviluppo e prende il suo turno come cella dominante. I grappoli di celle si formano in presenza di “gocce fredde” ovvero di residui di aria fredda in quota (situazione molto frequente in Pianura Padana dal momento che i venti provenienti da Ovest arrivano scavalcando i passi alpini). Le linee di celle, invece, si formano quando un fronte freddo al suolo solleva e spinge in avanti un blocco di aria calda preesistente.

Nel caso di un grappolo di celle che si muove verso est come nella Figura 4 a sinistra, le correnti discendenti della cella più matura (la 4) tendono a sollevare aria calda e umida dal lato ovest (ossia sopravvento). In questo modo si sviluppano e crescono le celle 2 e 1 che, a tempo debito, sostituiranno le celle 5 e 6 che si trovano in fase di dissolvimento. Poiché lo sviluppo di nuove celle ha luogo in direzione contraria allo spostamento, il temporale si muove molto lentamente e può stazionare per diverse ore su una zona limitata.

Al contrario, nel caso di una linea di celle come nella Figura 4 a sinistra, lo spostamento del temporale nella direzione ortogonale al moto del fronte freddo può essere molto veloce in quanto lo sviluppo di nuove celle ha luogo nella direzione del vento. Infatti, le nuove celle si formano sottovento dove agiscono le correnti ascendenti (in rosso) mentre le precipitazioni più intense, insieme con forti venti al suolo, si hanno nelle immediate vicinanze del fronte freddo dove agiscono le correnti discendenti (in azzurro). Ne risul-

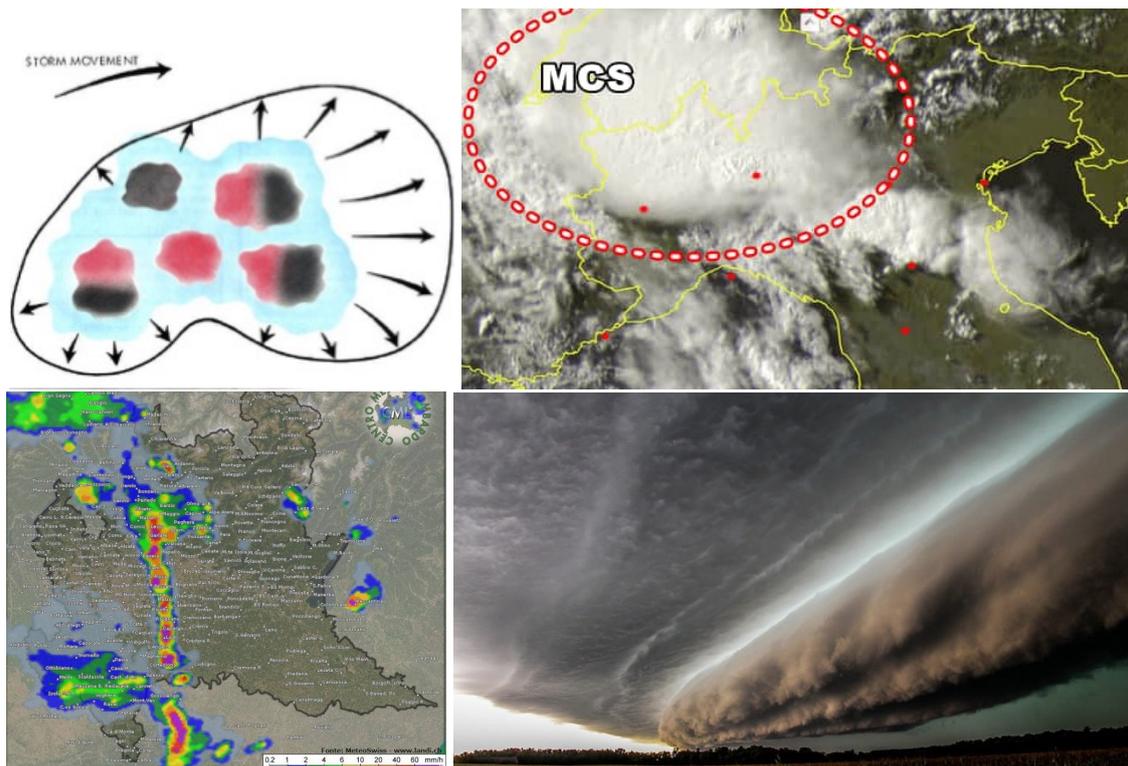


Figura 5: Sistema convettivi a mesoscala. In alto: numerosi grappoli di celle che incidono sulla stessa area, con a sinistra schema funzionale del sistema e a destra foto satellitare [NWGG a sinistra e Public Domain a destra]. In basso: più linee di celle ravvicinate con a sinistra foto satellitare di un temporale sulla Lombardia e a destra nube a mensola che accompagna temporali di questo tipo [Centro Meteo Lombardo a sinistra e Meteo Regione Lazio a destra].

tano temporali intensi, ma di rapida risoluzione sulle località attraversate che, una volta esaurite le precipitazioni, si ritrovano con l'atmosfera tersa e asciutta.

### 3.2 Sistemi Convettivi a Mesoscala - MCS

Come si è detto, i sistemi convettivi a mesoscala rappresentati nella Figura 5 in alto, sono costituiti da numerosi grappoli di celle che insistono sulla stessa area vasta (generalmente di forma ellittica), mentre quelli rappresentati nella Figura 5 in basso, sono formati da più linee di celle ravvicinate tra loro.

La formazione di sistemi temporaleschi costituiti da numerosi grappoli di celle (come anche la presenza di un solo grappolo) sono favorite dalla disponibilità di residui di aria fredda in quota. Ciò premesso, l'organizzazione di un sistemi a mesoscala si può spiegare con riferimento alla Figura 5 in alto a sinistra e all'ipotesi "forte" che sta alla base della figura stessa.

La figura ipotizza, infatti, che i diversi grappoli di celle attraversino dei cicli di vita analoghi a quelli di un temporale monocella: formazione, maturazione e dissolvimento. In armonia con tale ipotesi, i grappoli di celle nella figura presentano prevalentemente

correnti ascendenti (in rosso) quando sono in fase di sviluppo, correnti sia ascendenti (in rosso) sia discendenti (in grigio) quando sono in fase di maturazione e prevalentemente, correnti discendenti quando sono in fase di dissipazione. In questo quadro, le correnti discendenti dell'intero sistema temporalesco possono generare nuovi grappoli di celle e contribuire così all'auto-sostentamento. Per contro il sistema si estingue una volta che le correnti discendenti, fredde e secche, abbiano esaurito il serbatoio iniziale di aria calda e umida.

Per rendersi conto della vastità dell'area occupata da un sistema temporalesco costituito da numerosi grappoli di celle, basta considerare la fotografia satellitare nella Figura 5 in alto a destra nella quale si vede come tale area possa interessare più regioni.

(Con aree così vaste, tuttavia, molti autori preferirebbero classificare il sistema temporalesco come MCC - Mesoscale Convective Complex ovvero Complesso Convettivo a Mesoscala).

La formazione di sistemi temporaleschi a mesoscala costituiti da più linee di celle ravvicinate tra loro è favorita dallo scontro, lungo un'area di bassa pressione, tra masse di aria fredda (in rapido avanzamento), e masse di aria calda e umida (in lenta convergenza). Nell'immagine satellitare del maggio 2013 riportata nella Figura 5 in basso a sinistra, lo scontro ha avuto luogo in Lombardia tra masse di aria fredda (in rapido avanzamento da Ovest-Nordovest) e masse di aria calda e umida (in lenta convergenza da Est-Sudest). Il sistema risultante avanzava verso Est e si autoalimentava generando nuove celle ad Ovest, fino a quando non sono venute a mancare le correnti ascendenti di aria calda e umida.

Secondo gli osservatori il sistema era ben visibile anche da terra in quanto, come spesso accade con le linee ravvicinate di celle, era accompagnato da una nube a mensola, del tipo fotografato nella Figura 5 in basso a destra.

(Le nubi a mensola sono generate dalla massa d'aria fredda che scorre al di sotto, spingendo l'aria calda verso l'alto ed, a differenza dei cumulonembi, si collocano nella zona delle quote basse in quanto lo stesso fronte freddo fa condensare l'umidità contenuta nell'aria calda al suolo. La forma massiccia ed imponente di una nube a mensola, oltre ad offrire uno spettacolo molto apprezzato dagli osservatori del cielo, fa presagire che una tempesta imminente stia avvolgendo l'orizzonte e, quasi sempre, tale presagio è confermato dagli eventi che seguono.)

## 4 Temporali a supercella

I temporali a supercella, schematizzati nella Figura 6 sono i più pericolosi e potenti tra tutti i temporali. Fortunatamente, la loro formazione può avere luogo soltanto in presenza di particolari condizioni termofluidodinamiche che in Italia sono, per il momento, relativamente rare (anche se il riscaldamento globale sta facendo aumentare la loro frequenza, insieme a quella di tutti gli eventi estremi).

Prima di descrivere la morfologia di una supercella, conviene porre l'accento sul suo tratto distintivo: la corrente ascendente a vortice (definita mesociclone). Grazie alla rotazione tale corrente è moto stabile (si pensi ad una "trottola") e, come vedremo, consente al temporale di autoalimentarsi e, quindi, di durare per diverse ore. Infatti, nei temporali

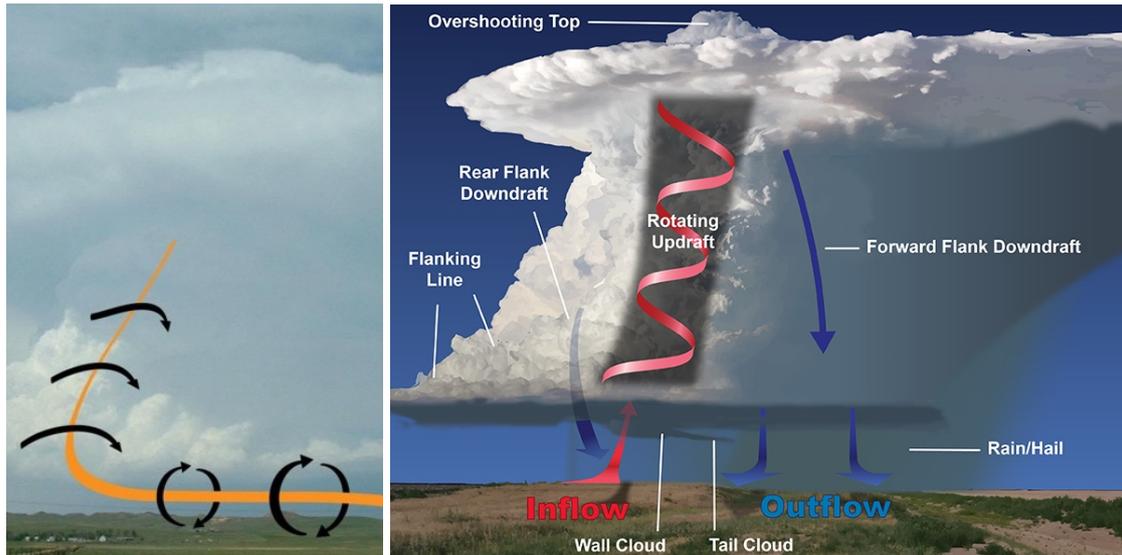


Figura 6: Temporali a supercella. A sinistra: genesi del mesociclone che caratterizza le supercelle [Wikipedia]. A destra: struttura finale di una supercella classica [NWS].

a supercella non è presente, in quanto superflua, la rigenerazione che, invece, non può mancare nei temporali multicellulari.

Sulla genesi del mesociclone vi è sostanziale concordanza tra i meteorologi circa la validità dello schema proposto nella Figura 6 a sinistra. Nello schema si ipotizza che, nelle vicinanze della superficie, si formi un vortice orizzontale dovuto al forte gradiente di velocità al suolo (ovvero alla rapida crescita di velocità con la quota nelle vicinanze della superficie). Una volta formato, tale vortice viene “risucchiato” dalla corrente ascendente del cumulonembo nel quale viene incorporato dando origine al mesociclone.

La struttura finale di una supercella, schematizzata nella Figura 6 a destra, mostra una cella temporalesca di enormi dimensioni che, in Italia, si sposta da Ovest ad Est (da sinistra a destra nella figura). In essa, il mesociclone, cioè la corrente ascendente a vortice, ha un diametro compreso tra 2 e 10 chilometri e, spesso, contiene un nucleo molto intenso del diametro di circa 1 chilometro che, talvolta, si trasforma in un tornado (tromba d’aria in linguaggio comune) aumentando la pericolosità delle supercella.

Oltre al mesociclone, altri elementi importanti nella struttura della supercella sono:

- il superamento in altezza del limite della troposfera (Overshooting Top) dovuto all’energia cinetica della corrente ascendente che consente di percorrere per inerzia anche un breve tratto nella stratosfera;
- la corrente fredda discendente dal fianco anteriore (Forward Flank Downdraft) nel quale, al di sotto della grande nube a forma di incudine, si hanno precipitazioni molto intense di pioggia mista a grandine (Rain/Hail);
- la corrente fredda discendente dal fianco posteriore (Rear Flank Downdraft) che, sostanzialmente, non porta a precipitazioni;

- la nube a muro (Wall Cloud) che si forma nella zona in cui la corrente discendente dal fianco anteriore si mescola con la corrente ascendente del mesociclone e, raffreddandola, genera condensa ad una quota più bassa rispetto alla base del cumulonembo;
- la nube a coda (Tail Cloud), rivolta verso il fianco anteriore, che si presenta come un'appendice della nube a muro ed è la traccia visiva del processo di condensazione dell'umidità dell'aria aspirata dal mesociclone;
- la linea di fiancheggiamento (Flanking Line) attraverso la quale, periodicamente, si infiltrano le alimentazioni supplementari di aria atmosferica che conferiscono alle supercelle il tipico carattere ciclico.

Si può aggiungere che le supercelle sono classificate in una delle tre categorie: classiche, ad alta precipitazione e a bassa precipitazione. Le **supercelle classiche** sono quelle che meglio corrispondono alla descrizione precedente. Esse sono caratterizzate da precipitazioni intense con grandine che può raggiungere dimensioni dell'ordine di alcuni centimetri. Si spostano molto velocemente sospinte da venti in quota forti (visualizzati dalla inclinazione in avanti del mesociclone nella Figura 6 a destra), riversano al suolo venti molto forti e, tra le supercelle, sono quelle che più spesso danno origine ai tornado (cioè alle trombe d'aria).

Le **supercelle ad alta precipitazione** si formano in condizioni di aria atmosferica molto calda e umida ma con venti relativamente deboli alle quote medie: di conseguenza le precipitazioni sono molto abbondanti ma cadono anche nell'area del mesociclone ostacolando l'autoalimentazione. Queste supercelle formano più raramente un tornado ma, nel caso lo producano, diventano molto pericolose perché il tornado nascosto dalla pioggia è difficilmente visualizzabile dai radar meteorologici.

Le **supercelle a bassa precipitazione** si formano in situazioni di relativamente bassa umidità atmosferica. Nonostante la scarsità delle precipitazioni la loro pericolosità resta elevata perché, generalmente, le poche precipitazioni si presentano sotto forma di grandine con chicchi di grandi dimensioni. Per contro, queste supercelle producono raramente dei tornado in quanto la loro base si trova ad una quota elevata. Un ulteriore pregio, agli occhi degli osservatori affezionati, è quello che la poca pioggia lascia vedere chiaramente la struttura del mesociclone all'interno.

## 4.1 Il lungo viaggio di una supercella

Come si è osservato nel paragrafo precedente, le supercelle assumono un carattere ciclico quando le correnti retrostanti si infiltrano attraverso la linea di fiancheggiamento (Flanking Line) e, in questo modo, forniscono alimentazioni supplementari di aria atmosferica. Così, non sorprende che una supercella ciclica possa durare per diverse ore e viaggiare per centinaia di chilometri, ma il viaggio descritto nella Figura 7 è senza precedenti a memoria d'uomo.

La supercella è nata il 13 luglio 2023 sotto forma di una forte perturbazione a Cosina, a circa 3 chilometri dal confine Italiano, come documentato dall'immagine radar nella Figura 7 in alto a sinistra pubblicata dal Servizio Meteorologico Nazionale Sloveno. Subito

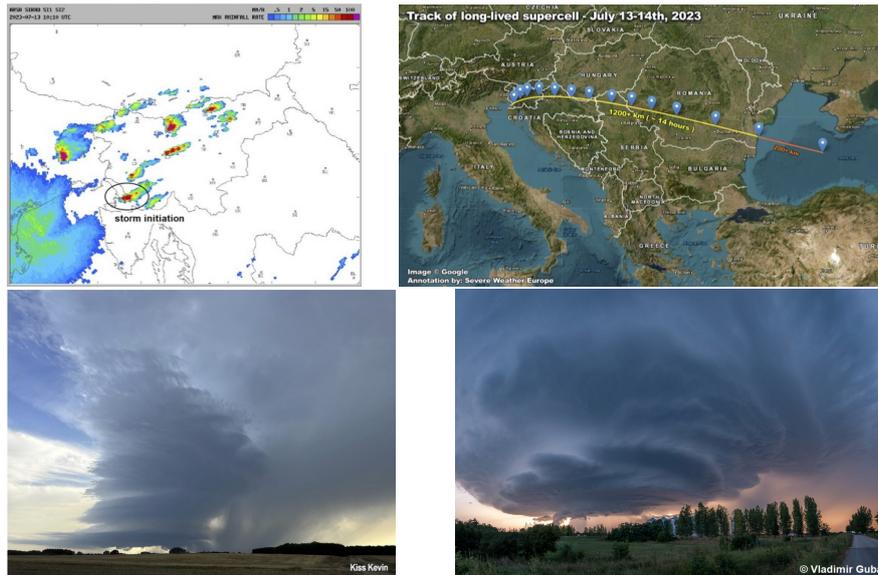


Figura 7: In alto: il lungo viaggio di una supercella con a sinistra la partenza da Cosina in Slovenia a tre chilometri dal confine italiano [ARSO SIRAD], e a destra il percorso percorso attraverso cinque Stati Balcanici [Blitzortung.org]. In basso: immagini della supercella con a sinistra foto in Ungheria ai confini con la Croazia [Kiss Kevin], e a destra foto in Serbia nelle vicinanze di Novi Sad [Vladimir Gubas].

dopo la partenza, grazie al forte gradiente di velocità al suolo, la perturbazione ha incorporato nelle vicinanze di Postumia una corrente ascendente a vortice, trasformandosi in supercella vera e propria.

Il percorso di oltre 1.200 chilometri circa attraverso Slovenia, Croazia, Ungheria del Sud, Serbia del Nord e Romania del Sud è poi stato ricostruito con grande accuratezza sulla base dell'attività elettrica ed è stato riportato su mappe del tipo di quella nella Figura 7 in alto a destra (avvalendosi dei dati della *Blitzortung.org* che fornisce informazioni in tempo reale su fulmini e temporali in Europa).

Naturalmente, durante il viaggio di circa 14 ore conclusosi nel Mar Nero il 14 luglio, non sono mancate le foto spettacolari come quelle scattate in Ungheria al confine con la Croazia e in Serbia nelle vicinanze di Novi Sad e riportate, rispettivamente, nella Figure 7 in basso a sinistra e nella Figura 7 in basso a destra.

## 5 La grandine

Il processo di formazione della grandine in un cumulonembo è schematizzato nella Figura 8 dalla quale si desume che il passo più importante è il trasporto molto rapido delle goccioline di pioggia oltre la linea di zero termico ad opera dalle correnti ascendenti. Al di sopra dello zero termico, le goccioline restano nello stato di liquido sottoraffreddato fin quando entrano in contatto con un un chicco di grandine in formazione e, a questo punto, congelano all'esterno del chicco stesso contribuendo alla sua crescita.

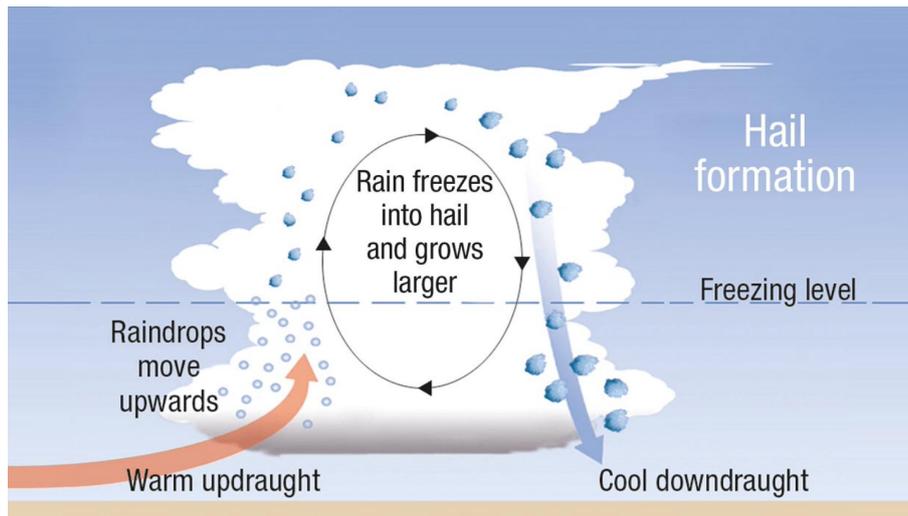


Figura 8: Formazione di grandine in un cumulonembo [Severe Weather Europe].

(Le goccioline restano allo stato di liquido “sottoraffreddato”, ovvero a temperatura inferiore a 0 °C, quando, a causa di un raffreddamento troppo rapido, non hanno ancora raggiunto l’equilibrio termodinamico. Infatti, lo stato di liquido sottoraffreddato non è stabile e basta un innesco, come il contatto con un chicco ghiacciato, per far congelare la gocciolina all’esterno del chicco stesso.)

Grazie a questo processo di crescita, i chicchi possono aumentare di dimensione fino a quando le correnti ascendenti sono abbastanza forti da sostenerli. Tipicamente, un chicco di grandine compie un solo viaggio di andata e ritorno entro il cumulonembo attraverso la linea di zero termico ma, nel caso di correnti trasversali e/o forti turbolenze, i chicchi possono compiere più viaggi. Poiché ogni viaggio consente la formazione di nuovo ghiaccio, si arriva in tempi brevi a strutture stratificate intorno ai nuclei originari che, spesso, crescono fino a raggiungere diametri di qualche centimetro.

Durante i temporali molto forti, come quelli prodotti dalle supercelle, oltre a correnti ascendenti e discendenti molto intense, si hanno anche correnti quasi orizzontali stabili in quanto legate alle infiltrazioni dell’aria di alimentazione attraverso la linea di fiancheggiamento. Pertanto, i viaggi multipli di andata e ritorno attraverso la linea di zero termico sono pressoché garantiti e, di conseguenza, aumenta la probabilità che anche i chicchi più piccoli si scontrino tra di loro fondendosi, e in questo modo diano origine ad “agglomerati” con dimensioni dell’ordine di una decina di centimetri ed oltre. Infatti, l’unico limite alla crescita dei chicchi (o meglio degli agglomerati) è dato dalla capacità delle correnti ascendenti di sostenerli. Quando, dopo aver raggiunto dimensioni enormi, gli agglomerati precipitano al suolo, possono dare origine a “bombardamenti con proiettili di ghiaccio” che causano danni catastrofici.

(La forza aerodinamica di sostegno di chicchi e agglomerati esercitata dalle correnti ascendenti è proporzionale al prodotto del quadrato della velocità delle correnti stesse moltiplicato per l’area della sezione trasversale di “vela”. Naturalmente, la forza di sostegno può trasformarsi immediatamente in spinta alla caduta se, nella discesa, chicchi e

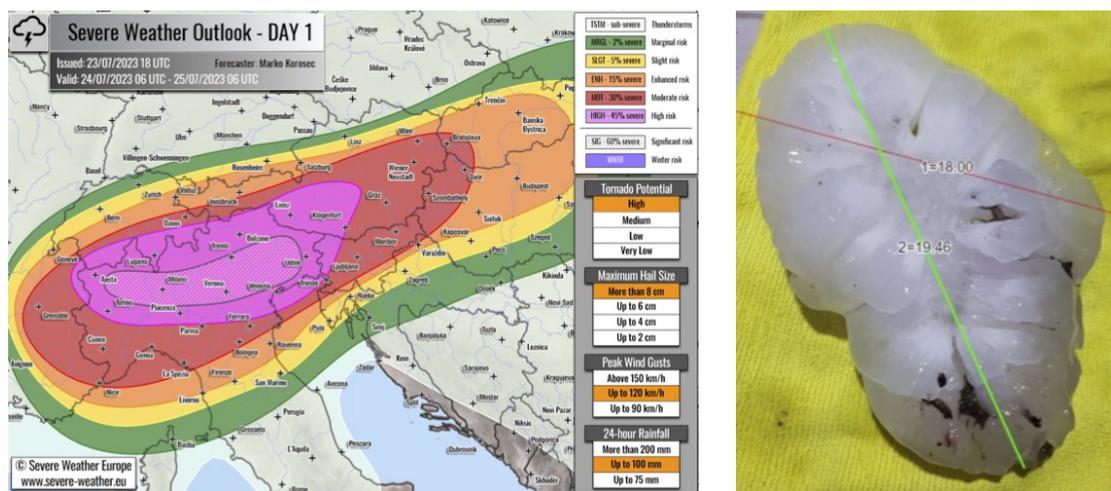


Figura 9: Grandinata in FVG del 24 e 25 luglio 2023. A sinistra: previsioni meteo che annunciano gli eventi [Severe Weather Europe]. A destra: chicco di grandine con dimensione massima di circa 20 cm fotografato a Tiezzo di Azzano Decimo verso le 23 del 24 luglio [Marilena Tonin].

agglomerati incappano in correnti discendenti.)

## 5.1 Temporalità in Friuli Venezia Giulia

Nel mese di luglio 2023, in Friuli Venezia Giulia si sono verificati numerosi temporali forti. Particolarmente rilevanti sono stati i temporali della notte tra il 24 e il 25 luglio perché hanno prodotto delle grandinate veramente devastanti. Già le previsioni meteorologiche per il 24 e il 25 luglio, riportate nella Figura 9 a sinistra, promettevano chicchi di grandine oltre gli 8 centimetri e raffiche di vento fino a 120 km/h ma alcuni eventi, descritti nel seguito, hanno persino superato tali previsioni.

In particolare ci si riferisce a due supercelle, nate tra Piemonte e Lombardia tra le 18 e le 19 del 24 luglio, che hanno percorso tutta la Pianura Padana e, in serata, sono arrivate in Friuli Venezia Giulia. Verso le 21, la prima supercella ha causato la maggior parte dei danni da grandine nella zona tra Mortegliano e Palmanova. Verso le 23, la seconda supercella ha portato la grandine con i chicchi (o meglio gli agglomerati) più grossi, tra i quali il “chicco record Europeo” della Figura 9 a destra, fotografato a Tiezzo di Azzano Decimo.

(Dalle stime ufficiose, fatte sulla base della foto dall’ESSL - European Severe Storm Laboratory, il lato maggiore del chicco record sfiorava i 20 centimetri, mentre il peso si aggirava intorno ad 1 chilogrammo. Oltre alla foto del “chicco record”, ci sono poi state moltissime altre immagini di chicchi con dimensioni intorno ai 10 cm.)

In aggiunta alla grandine, i temporali del 24 e 25 luglio, hanno portato moltissimi fulmini e forti colpi di vento, con raffiche di 103 km/h a Brugnera e Lauzacco. Al contrario, la pioggia misurata non è stata molta e ciò farebbe classificare le due supercelle tra quelle a bassa precipitazione. Nei centri abitati le grandinate hanno danneggiato gravemente auto, isolamenti esterni “a cappotto”, infissi, tetti e pannelli fotovoltaici mentre,

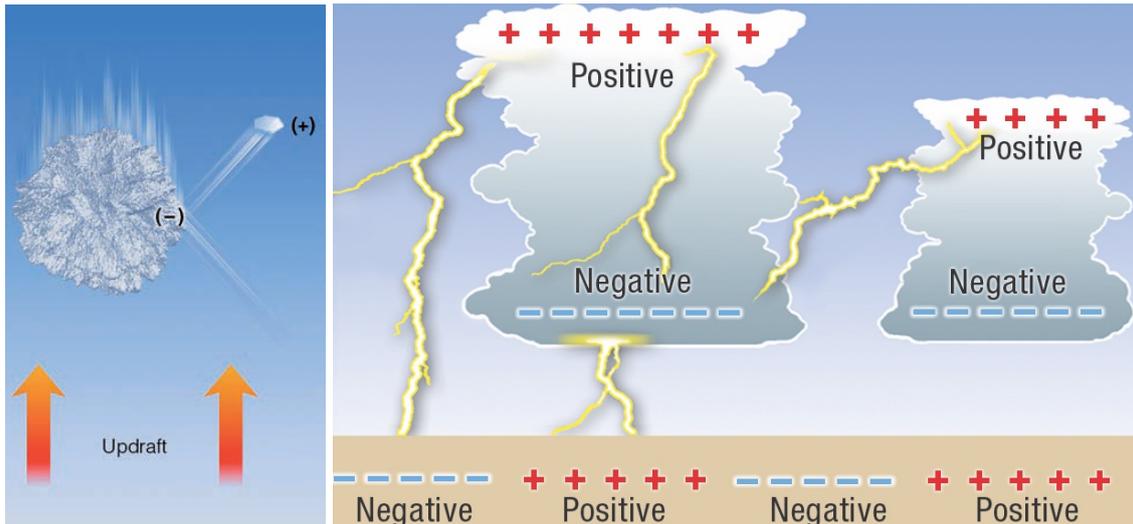


Figura 10: Processi di carica nelle nubi. A sinistra: collisione con trasferimento di un elettrone tra una microparticelle di ghiaccio che sale e un chicco di gragnola che scende [C. D. Ahrens e R. Henson]. A destra: principali tipologie di fulmini che si possono avere nella situazione finale risultante: intranube, nube - nube, parte bassa negativa di una nube - suolo positivo, parte alta positiva di una nube e suolo negativo [Australian Government].

nelle campagne colpite, hanno distrutto completamente le coltivazioni. La stima del danno economico complessivo in Friuli Venezia Giulia è molto elevata: ad esempio solo a Mortegliano, un comune con meno di 5.000 abitanti, la stima si è aggirata intorno a 125 milioni di euro.

## 6 I fulmini

I fulmini sono scariche elettriche ad alto contenuto energetico che hanno luogo all'interno di una nube, tra due nubi o tra una nube e il terreno. Evidentemente, le scariche presuppongono dei processi elettrostatici di carica delle nubi e la descrizione più condivisa di tali processi è quella riassunta nella Figura 10.

Il primo passo, illustrato nella Figura 10 a sinistra, è quello delle collisioni tra le microparticelle di ghiaccio (più piccole e leggere) che salgono trasportate dalle correnti ascendenti ed i chicchi di gragnola (sostanzialmente palline di neve più grandi e pesanti) che scendono per gravità. Durante una collisione tipica, una microparticella cede un elettrone caricandosi positivamente, mentre il chicco acquista l'elettrone caricandosi negativamente. Poiché, come si è detto, le microparticelle tendono a salire mentre i chicchi tendono a scendere, si arriva rapidamente alla distribuzione di cariche elettriche nelle nubi schematizzata nella parte superiore della Figura 10 a destra.

Nel terreno, rappresentato nella parte inferiore della Figura 10 a destra, la situazione è più articolata. Infatti, in condizioni normali il terreno contiene un eccesso di elettroni e, di conseguenza, il suolo è contrassegnato come negativo nelle due aree esterne al perimetro delle nubi. Per contro, non appena una nube con la base carica negativamente



Figura 11: Principali tipologie di fulmini già citate nella 10 a destra. Procedendo da sinistra: intranube, tra nube e nube, tra parte bassa negativa di una nube e suolo positivo e tra parte alta positiva di una nube e suolo negativo [Public Domain per le prime tre immagini e C.D. Ahrens e R. Henson per la quarta].

si affaccia sopra una porzione di suolo, gli elettroni del terreno vengono allontanati per effetto elettrostatico (in quanto le cariche di segno uguale si respingono) e, infatti, il suolo è contrassegnato come positivo nelle due aree sottostanti alle nubi.

Durante i processi di carica, i campi elettrostatici che si creano (all'interno di una stessa nube, tra nube e nube e tra nube e suolo) aumentano progressivamente di intensità all'aumentare del numero di cariche accumulate. A un certo punto, però, l'intensità di tali campi supera il potere isolante dell'aria e si hanno le scariche elettriche schematizzate con le quattro tipologie di "fulmini" illustrate nella Figura 10 a destra e fotografate nella Figura 11.

L'ordine delle fotografie di fulmini nella Figura 11, è lo stesso già citato nella didascalia della precedente Figura 10 a destra, per cui si ha partendo da sinistra:

- fulmine fra zona negativa e positiva di una stessa nube che illumina la nube interessata
- fulmine fra una zona negativa e una positiva di due nubi diverse con il classico andamento orizzontale molto allungato;
- fulmini tra le parti basse (negative) di una nube e aree di terreno positive in quanto sottostanti alla nube stessa, e
- fulmine ramificato tra la parte alta (positiva) di una nube e aree di terreno negative in quanto esterne al perimetro della nube.

L'energia liberata dai fulmini riscalda l'aria circostante che, in pochi milionesimi di secondo, raggiunge temperature dell'ordine delle decine di migliaia di gradi e, allo stesso tempo, aumenta enormemente la sua pressione dando origine a forti impulsi acustici (onde d'urto) percepiti come tuoni. In aggiunta, la temperatura elevatissima trasforma l'aria in un "plasma" di ioni negativi e positivi che, ricombinandosi immediatamente dopo la scarica, dà origine ai lampi.

Grazie alla diverse velocità di propagazione nell'aria della luce (300.000 chilometri al secondo) e del suono (circa 333 metri, ovvero 1/3 di chilometro al secondo), si può stimare



Figura 12: Fasi di un fulmine negativo: partenza della scarica pilota a sinistra; risalita degli ioni positivi attraverso un conduttore alto al centro; scarica di ritorno a destra [C. D. Ahrens e R. Henson].

la distanza di un temporale contando i secondi che separano i lampi, percepiti istantaneamente, dai tuoni percepiti con ritardo. Infatti, dividendo per 3 il numero di secondi di ritardo del tuono si ottiene la distanza del temporale espressa in chilometri. Inoltre, se nel tempo tale ritardo aumenta, o diminuisce, si può anche sapere se il temporale si allontana, o si avvicina, al nostro punto di osservazione.

## 6.1 Dinamica dei fulmini

Prima di tutto, si può osservare che l'aria è un isolante, in quanto le molecole che la formano sono elettricamente neutre e, quindi, consentono il passaggio di una corrente elettrica solo se vengono precedentemente "ionizzate" (negativamente fornendo elettroni o positivamente togliendo elettroni). Come si è detto, durante i temporali si creano zone cariche negativamente nelle parti basse delle nubi e nelle aree di suolo esterne al perimetro delle nubi (entrambe caratterizzate da un eccesso di elettroni). Per contro, zone cariche positivamente si creano nelle parti alte delle nubi e nelle aree di suolo sottostanti alle nubi (entrambe caratterizzate da un difetto di elettroni).

Ciò premesso, le fasi di formazione di un fulmine possono essere convenientemente descritte facendo riferimento alle situazioni più pericolose per la vita di tutti i giorni, ovvero ai fulmini che arrivano al suolo. Tra essi, i più frequenti sono i fulmini detti negativi in quanto partono dalla zona bassa (caricata negativamente) di una nube e arrivano al suolo in un'area sottostante alla nube stessa (e quindi caricata positivamente).

In questo caso, come indicato nella Figura 12 a sinistra, un flusso di ioni negativi in partenza dalla nube si dirige verso il suolo sotto forma di "scarica pilota" (stepped leader in inglese). La scarica pilota scende a tratti di una cinquantina di metri alla volta, ed è troppo debole per essere vista da terra. Tuttavia, man mano che tale scarica si avvicina al suolo, un flusso di ioni positivi le si muove incontro da terra scegliendo, generalmente, percorsi "alti" come, ad esempio, l'albero nella Figura 12 al centro, ma anche un edificio o, persino, una persona in piedi. Quando il flusso verso il basso di ioni negativi incontra il

flusso verso l'alto di ioni positivi, dal terreno parte una forte "scarica positiva di ritorno", schematizzata nella Figura 12 a destra, che costituisce la fase finale visibile del fulmine.

Per contro, un fulmine nube - suolo come quello illustrato dalla foto più a destra nella Figura 11, viene detto positivo in quanto si stacca dalla parte alta (caricata positivamente) di una nube. In questo caso, si intuisce che la scarica pilota deve essere costituita da ioni positivi mentre, necessariamente, la scarica di ritorno è costituita da ioni negativi in quanto si stacca da un'area di suolo esterna al perimetro della nube (e quindi caricata negativamente). Fulmini di questo tipo sono molto meno frequenti ma anche molto più pericolosi perché, a terra, coinvolgono zone considerate sicure in quanto, come si è detto, sono lontane, e talvolta anche di diversi chilometri, dal raggio d'azione "diretto" dei temporali. Infatti, un ipotetico osservatore di questi fulmini potrebbe veder arrivare a terra una saetta pur con cielo sereno sulla propria verticale (ed a ragione riferirebbe di "un fulmine a ciel sereno").

## 6.2 Protezione dai fulmini

Il parafulmine, inventato da Benjamin Franklin (1706 -1790), è il più antico dispositivo di protezione. Esso si basa sulla osservazione che, a pari densità di distribuzione delle cariche elettriche su una superficie esterna, il campo elettrostatico nelle vicinanze di una punta è più intenso. Infatti le cariche di ugual segno si respingono con forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza reciproca e, al ridursi di tale distanza in vicinanza delle punte (per le evidenti evidenti ragioni geometriche schematizzate nella Figura 13 in alto a sinistra), possono addirittura aumentare fino al punto da disperdere parte delle stesse cariche nell'aria. Ciò crea un "invito" per le cariche di segno opposto provenienti da una nube temporalesca a scegliere la punta come meta della scarica pilota.

Con riferimento all'impianto parafulmine illustrato nella Figura 13 in alto a destra si può quindi ipotizzare che il terreno sia carico negativamente in quanto si trova fuori dal perimetro di azione delle nubi. Grazie al parafulmine, vi è una probabilità elevata che una scarica pilota positiva, partita dalla parte alta di una nube, arrivi alla punta e inneschi la scarica di ritorno negativa durante la quale vengono utilizzati gli elettroni prelevati dal terreno al quale è collegato il parafulmine (e non da qualche zona critica dell'edificio). Chiaramente, con polarità cambiate, il parafulmine funzionerebbe ugualmente bene con terreno positivo in quanto sottostante ad una nube temporalesca, e una scarica pilota negativa partita dalla parte basse di una nube. In quest'ultimo caso la scarica di ritorno sarebbe positiva e utilizzerebbe gli ioni positivi del terreno.

I parafulmini vengono impiegati per la protezione di strutture a rischio molto elevato, come antenne e guglie, ma il dispositivo di protezione dai fulmini di uso pressoché universale è la gabbia di Faraday. La gabbia è basata sulla scoperta di Michael Faraday (1761-1867) che i conduttori sono in equilibrio elettrico e che le eventuali cariche elettriche in eccesso si dipongono sulla superficie esterna e non hanno alcuna influenza sugli spazi interni.

Le straordinarie proprietà della gabbia sono state oggetto di una serie di spettacolari dimostrazioni del tipo si quella illustrata nella Figura 13 in basso a sinistra. Più sobriamente, il principio della gabbia di Faraday viene oggi universalmente applicato alla protezione degli edifici dalle scariche atmosferiche realizzando impianti del tipo di quello schematiz-

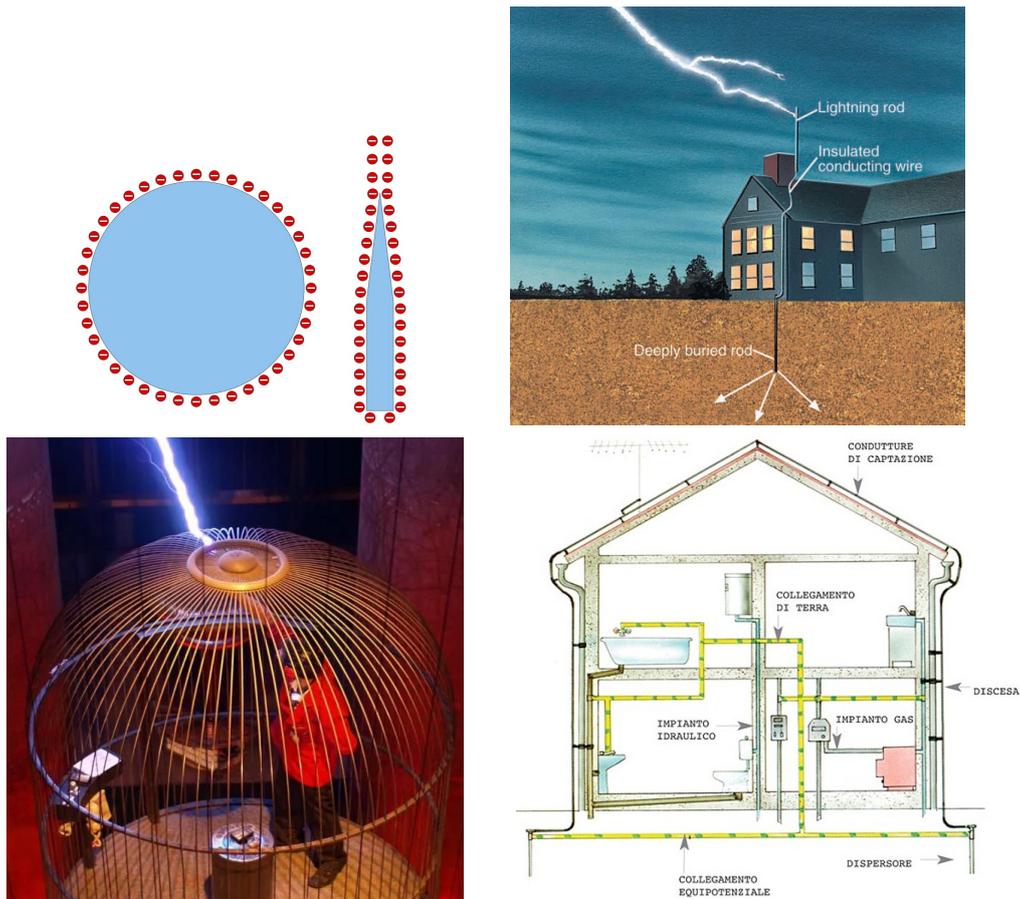


Figura 13: Protezione dai fulmini. In alto: a sinistra effetto punta [Wikipedia] e a destra sfruttamento di tale effetto in un impianto parafulmine [C. D. Ahrens e R. Henson]. In basso: a sinistra il principio di funzionamento della Gabbia di Faraday [Wikipedia] e a destra il suo utilizzo negli impianti di protezione degli edifici [Creative Commons].

zato nella Figura 13 in basso a destra. Inoltre, va osservato che strutture metalliche molto diffuse (come, ad esempio, automobili e aerei) sono, di per sé, delle gabbie di Faraday e, quindi, proteggono efficacemente gli occupanti all'interno purché questi ultimi evitino di toccare parti metalliche collegate all'esterno.

### 6.3 Rischio di fulminazione

Il “rischio” connesso ad un pericolo è il prodotto della probabilità per il danno e, quindi, il rischio di fulminazione va gestito a partire dalla conoscenza dei principali modi in cui una persona può essere colpita da un fulmine. Infatti, solo così si possono mettere in atto i comportamenti più appropriati per la riduzione della probabilità di eventi come le fulminazioni, che possono portare a conseguenze gravissime. Nella letteratura tecnica le principali tipologie di fulminazione sono descritte con riferimento ad infografiche del tipo di quella riportata nella Figura 14 nella quale sono riassunti i meccanismi di danno ed, implicitamente, sono indicate le situazioni da evitare.

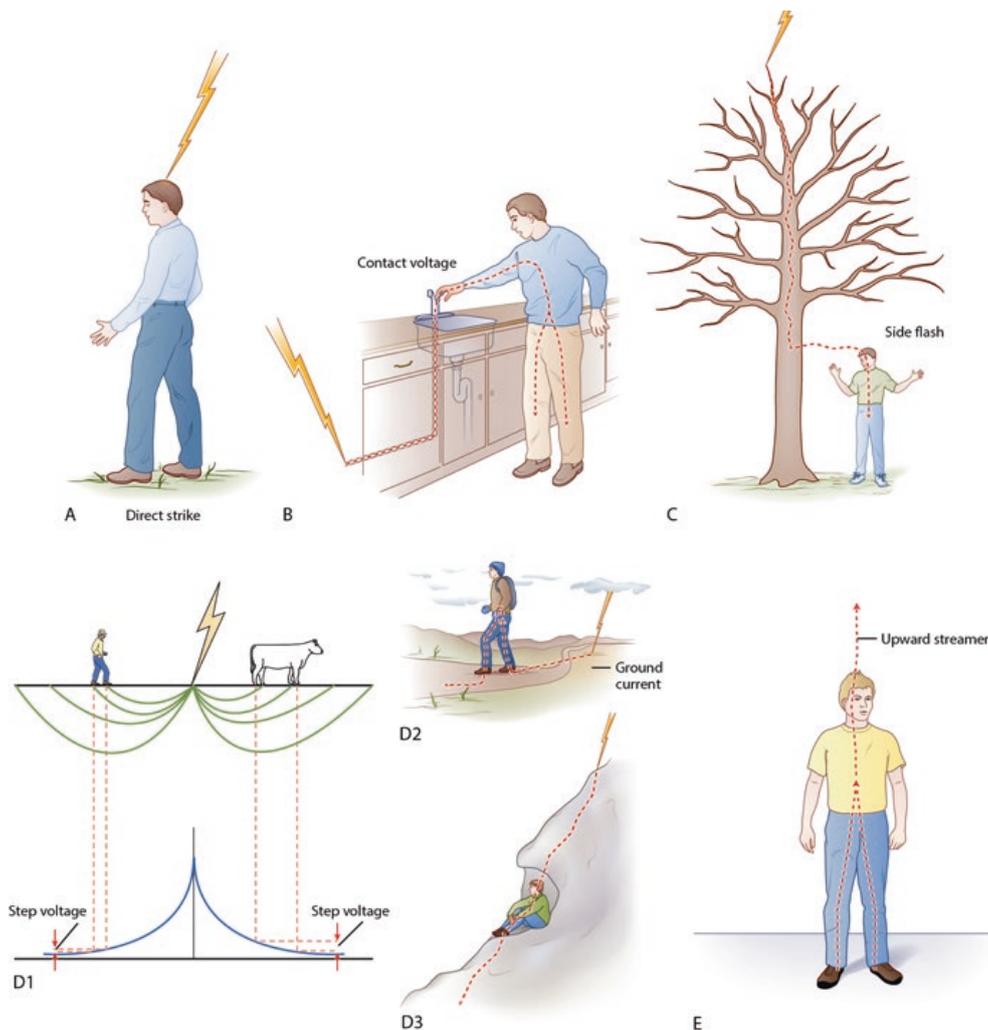


Figura 14: Possibili fulminazioni: fulminazione diretta (direct strike), scarica per contatto (contact voltage), scarica di rimbalzo (side flash), tensione di passo (step voltage), corrente di terra (ground current) e canale ionizzato ascendente (upward streamer) ([M.A. Cooper e R. L. Holle]).

### A. Fulminazione diretta

Le probabilità di venir colpiti direttamente da un fulmine sono molto basse ma i danni che ne possono risultare sono, evidentemente, gravissimi. Una persona colpita da un fulmine diventa parte di un circuito elettrico nel quale la maggior parte della corrente resta in superficie causando danni allo strato esterno della cute, ma una frazione può attraversare il corpo provocando danni, abbastanza spesso letali, al sistema cardiocircolatorio (arresto cardiaco) e al sistema nervoso (crisi convulsive e perdita di coscienza). Il consiglio è quindi: in caso di temporale non farsi trovare all'aperto.

## **B. Scarica per contatto**

I metalli non attraggono i fulmini ma, essendo buoni conduttori elettrici, forniscono dei percorsi preferenziali mettendo in tensione parti metalliche spesso lontane dal punto di scarica. Come si è visto in precedenza, le parti metalliche degli edifici, comprese quelle degli impianti idraulici ed elettrici interni, dovrebbero essere “messe a terra” e, quindi, non dovrebbero costituire un pericolo per le persone. D’altra parte non si può escludere che qualche impianto si trovi in tensione perché colpito da un fulmine esterno e non sia collegato a terra nel percorso tra il punto di arrivo esterno del fulmine e l’alloggio (si pensi, ad esempio, agli impianti telefonici a filo e agli impianti di antenna) e, di conseguenza, è bene staccare telefoni e antenne televisive durante i temporali.

## **C. Scarica di rimbalzo**

Le scariche di rimbalzo possono verificarsi quando la “vittima” viene a trovarsi a poca distanza da un oggetto colpito da un fulmine. (Caso tipico quello di un albero sotto il quale la vittima si rifugia cercando protezione da pioggia e grandine). In questo modo, tra struttura e vittima si crea una differenza di potenziale che può essere abbastanza alta da superare la rigidità dielettrica dell’aria. Si genera così una scarica elettrica secondaria che passa attraverso il corpo della vittima portando energia più che sufficiente a causare danni anche gravissimi.

## **D. Corrente di terra**

Quando un fulmine colpisce il terreno, o un qualunque oggetto in contatto col terreno, scarica la sua enorme energia sulla superficie sotto forma di corrente elettrica che si propaga nelle vicinanze della superficie del terreno. Infatti, in prossimità del punto di arrivo del fulmine la corrente di terra crea la distribuzione di potenziale elettrico schematizzata nella sotto figura D1. Pertanto, i piedi di persone o le zampe di animali fermi in contatto col terreno sono soggetti a differenze di potenziale, dette “tensioni di passo”, che crescono con la distanza tra i punti di appoggio (e diminuiscono progressivamente con la distanza dal punto di arrivo del fulmine). Quindi, le tensioni di passo sono particolarmente pericolose per il bestiame fermo a causa della grande distanza tra zampe anteriori e posteriori ma non sono piacevoli nemmeno per gli umani che, come nella sotto-figura D2, camminano a passi “da alpino”. Infine è importante evitare situazioni come quelle della sotto-figura D3 perché, in montagna attraverso le rocce, la corrente di terra tende a formare archi elettrici che scavalcano facilmente l’imbocco di una piccola cava.

## **E. Canali ionizzati ascendenti**

Non tutti i canali ionizzati in partenza dal suolo si collegano alle scariche pilota provenienti dalle nubi, ma basta che una persona sia attraversata dagli ioni convogliati da un canale ascendente per riportare danni molto gravi, in quanto la corrente nei canali ascendenti può raggiungere, sia pure per pochi microsecondi un’intensità di decine se non centinaia di ampere. Occorre quindi cercare immediatamente un rifugio all’interno di

un edificio in presenza di segnali personali che indichino la formazione di canali ionizzati nelle vicinanze, quali: capelli dritti, sensazioni di formicolio e odore di ozono.

## Bibliografia

**C.D. Ahrens e R. Henson**, *Meteorology Today - An Introduction to Weather, Climate and the Environment -13<sup>a</sup> ed.*, Cengage, Boston, Ma., 2022.

**J. T. Allen e altri**, *Understanding hail in the Earth system*, Reviews of Geophysics, 58, 2019.

**ARPA FVG**, *Un luglio fresco e perturbato*, meteo.fvg, Report luglio 2023.

**Australian Governement - Bureau of Meteorology**, *Explainer: what is thunder*, 1 giugno 2018, visto 9 ottobre 2023.

**B. Buckley, E. J. Hopkins e R. Whiteaker**, *Meteorologia*, Touring Club Italiano, Milano, 2006.

**C. Cassardo e altri**, *Temporali e Tornado*, Alpha Test, Milano, 2020.

**G. Comini e M. Libralato**, *Il Cambiamento Climatico - Il Punto di Vista Fisico-Tecnico, Nuova Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e G. Cortella**, *Fondamenti di Trasmissione del Calore, Ristampa della Quarta Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e S. Savino**, *Fondamenti Termodinamici dell'Energetica, Terza Edizione Rivista e Aggiornata*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**M.A. Cooper e R.L. Holle**, *Reducing Lightning Injuries Worldwide*, Springer Natural Hazards, Cham, Svizzera, 2019.

**DEHN ITALIA S.P.A.**, *Manuale per la protezione contro i fulmini, Terza Edizione*, Bolzano, 2016.

**S. Eisenbach**, *Hail record broken again – 19 cm hailstone confirmed in Italy*, ESSL - European Severe Storms Laboratory, 25 luglio 2023.

**M. Korosec**, *A historic long-lived supercell storm with giant 14 cm hailstones tracks for more than 1200 km across five European countries leaving severe wind and hail damage along its path*, Severe Weather Europe, 15 luglio 2023, Visto 9 ottobre 2023.

**M. Korosec**, *Severe Weather Forecast / Outlook for Europe*, 24 e 25 luglio 2023, Severe Weather Europe, Visto 9 ottobre 2023.

**Meteo Expert**, *Manuale di Meteorologia*, Alpha Test, Milano, 2019.

**Meteo Lazio**, *Nubi Temporalesche – Linea di Multicelle, Squall-line o Linea di groppo*, 1 giugno 2018, visto 9 ottobre 2023.

**NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration**, *Types of Thunderstorms*, 9 maggio 2023, Visto 9 ottobre 2023

**NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration**, *Life Cycle of a Thunderstorm*, 23 maggio 2023, Visto 9 ottobre 2023

**NWCG - National Wildfire Coordinating Group**, *10. Thunderstorm*, Fire Weather, OMS 425-1, USA.GOV, Visto 9 ottobre 2023

**NWS - National Weather Service**, *Spotter's Field Guide: The Supercell Pts. 1 and 2*, USA.GOV, Visto 9 ottobre 2023

**NWS - National Weather Service**, *Lightning Science: Five Ways Lightning Strikes People*, USA.GOV, Visto 9 ottobre 2023

**NWS - National Weather Service**, *Understanding Lightning: Ground Current*, USA.GOV, Visto 9 ottobre 2023

**P. Randi e P. M. Dekra**, *Temporali 1*, AMRO - Associazione Meteo Professionisti, 9 luglio 2020, Visto 9 ottobre 2023.

**J. Walker**, *The Flying Circus of Physics, 2nd Ed.*, Wiley, 2007.

**Wikipedia**, *List of Cloud Types*, Visto 9 ottobre 2023.

**WMO - World Meteorological Organization**, *International Cloud Atlas - Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*, WMO - No. 407, 1975 e aggiornamenti successivi visti 9 ottobre 2023.