

POLITECNICO DI TORINO



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO

RICOSTRUZIONE DELLE FORZANTI METEO DA SENSORI REMOTI
DELL'EVENTO ALLUVIONALE DEL 19-24 OTTOBRE 2019 IN
PIEMONTE

RELATORE
PROF. PIERLUIGI CLAPS
CORRELATORE
ING. PAOLA MAZZOGLIO

CANDIDATA
ELENA GALVANO
255122

A.A 2020/2021



INDICE

Sommario.....	1
Il Rischio Idrogeologico e gli Strumenti di Remote-Sensing.....	1
La Prevenzione del Rischio Idrogeologico	1
La Previsione del Rischio Idrogeologico e il Radar Meteorologico	3
I sistemi Radar-Pluviometro: Eventi Convettivi in Piccoli Bacini Idrografici	6
Ottimizzazione dell'Informazione del Radar Meteo e l'Introduzione del Dato delle Fulminazioni	7
Stima della Precipitazione Mediante Radar Meteorologico.....	9
La Relazione tra Riflettività e Intensità di Pioggia	9
Metodologie di Stima Mediante Approccio "Non Adattativo"	11
Metodologie di Stima mediante Approccio "Adattativo"	12
Alfieri et al. 2010	13
Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo ATS (2015).....	15
Le Fulminazioni e i Fenomeni Convettivi.....	17
Introduzione	17
Relazione Temporale e Spaziale tra Fulminazioni e Precipitazioni Convettive	18
Relazione Quantitativa tra Scariche Elettriche e Precipitazioni	19
Stima delle precipitazioni con modelli basati sul fattore RLR.....	21
L'evento Alluvionale del 19-24 Ottobre 2019 in Piemonte	24
Introduzione	24
Analisi del Quadro Meteorologico.....	27
La prima fase: 19-21 ottobre	27
Seconda fase: 22-24 Ottobre	32
I Principali Effetti al Suolo	33
Metodo ATS (2015): Evento Alluvionale del Basso Alessandrino 19-24/10/2019.....	36
Applicazione Metodo ATS (2015).....	36
Ricostruzione del Campi di Pioggia dal Metodo ATS (2015).....	41
Metodologia applicata	41
Risultati e discussione	42
Introduzione del Dato delle Fulminazioni.....	48
Introduzione	48
Elaborazione dei Dati.....	50
I dataset disponibili	50
La definizione dell'area di interesse.....	52
La modalità di trattazione dei dati.....	54
Presentazione e Discussione dei Risultati.....	56



Relazione intensità di pioggia - frequenza delle fulminazioni	56
Correlazione temporale tra precipitazioni convettive e fulminazioni	60
Correlazione spaziale tra precipitazioni convettive e scariche elettriche	68
Relazione tra eventi di pioggia intensi e polarità delle scariche elettriche.....	71
Relazione quantitativa tra precipitazioni e scariche elettriche e definizione del parametro Rain-Lightning- Ratio (RLR).....	73
Impiego del fattore RLR per stimare le piogge.....	78
Ricostruzione della pioggia areale dal dato delle scariche elettriche	83
Limiti della stima della precipitazione mediante l'applicazione del fattore RLR costante.	85
Introduzione della metodologia "adattativa" di calibrazione del parametro RLR	85
Ricostruzione della pioggia areale dal dato delle scariche elettriche	90
Conclusioni	92
ALLEGATO I - Il Radar Meteorologico	95
Evoluzione e Sviluppo Tecnologico del Radar Meteorologico	95
Il funzionamento del Radar Meteorologico	97
L'Informazione Radar.....	98
Errori Radar nella Stima del Campo delle Precipitazioni	101
I Prodotti Radar.....	103
ALLEGATO II - Le Reti di Rilevamento delle Fulminazioni	106
Introduzione: Le scariche Elettriche	106
La formazione delle scariche elettriche.....	106
La classificazione delle scariche elettriche	108
I Sistemi di Rilevamento delle Fulminazioni.....	109
Il rilevamento del campo elettromagnetico	110
Range di frequenze impiegati per il rilevamento	111
Tecniche di geolocalizzazione	111
Caratteristiche prestazionali dei sistemi di rilevamento operanti mediante vari range di frequenza	114
Parametri operativi delle reti di rilevamento.....	118
Caratteristiche prestazionali	118
Validazione delle caratteristiche prestazionali dei sistemi di rilevamento.....	119
Allegato III – Bollettini di Vigilanza e Criticità.....	123
Bibliografia	125
Sitografia	126



Sommario

Le intense precipitazioni di natura convettiva che, negli ultimi anni, hanno colpito duramente il territorio nazionale, hanno fatto emergere l'importanza delle attività di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico, più di quanto questa fosse riconosciuta in passato. In questo lavoro di tesi, si è scelto di esaminare i vantaggi derivanti dall'introduzione di nuovi strumenti di remote-sensing e di nuove metodologie di elaborazione dati, a supporto delle attività di previsione. Il radar meteorologico, al giorno d'oggi, ha assunto un ruolo principale nel monitoraggio e nel nowcasting dei fenomeni precipitativi infatti, tale strumento viene giornalmente impiegato nelle attività svolte dai Centri Funzionali del Dipartimento di Protezione Civile. L'elaborazione del dato di riflettività avviene generalmente mediante l'applicazione di una legge empirica Z-R a parametri fissi (Marshall&Palmer, 1948) che, se da una parte permette la stima della precipitazione mediante un discreto onere computazionale, dall'altra è soggetta ad un errore, derivante dall'impiego di parametri caratteristici costanti e non tarati sui territori d'interesse, che comporta una forte sovrastima dei valori di pioggia. Per far fronte a tale criticità si è dunque deciso di valutare l'introduzione di approccio di stima "adattativo". Tale metodologia, identificata nel metodo ATS (2015), è stata applicata ad un caso studio, in particolare: gli eventi alluvionali avvenuti nel Basso Alessandrino nell'ottobre 2019. Una volta validati i risultati, è stata messa a punto una procedura che, sulla base dei parametri puntuali di output forniti dalla metodologia adottata, permetta di ottenere, con buoni risultati, la stima della distribuzione della precipitazione. Inoltre, si è valutata l'introduzione nei processi previsionali di un ulteriore fattore, identificato nelle fulminazioni. Tale informazione viene monitorata quotidianamente dalla rete di rilevamento Lampinet dell'Aeronautica Militare Italiana, non viene ancora sfruttata nei modelli previsionali. I risultati ottenuti dall'analisi della correlazione piogge-fulminazioni, sulla base dei dati relativi al caso studio, possono essere considerati soddisfacenti, in quanto: l'osservazione delle scariche elettriche fornisce informazioni, con un breve anticipo, relativamente all'intensità e la posizione dei nuclei convettivi. Il rilevamento dei processi di elettrificazione delle nubi, così come l'osservazione del dato di riflettività delle idrometeore, non genera una misura diretta dell'altezza di pioggia, ma grazie al monitoraggio di questi, è possibile ottenerne una stima. Si è quindi identificata una metodologia che permetta di ottenere una stima dei valori di precipitazione attesi, partendo dall'analisi delle fulminazioni, avvenute in un intervallo temporale precedente. La stima prodotta non risulta esente da errori, che nella maggior parte dei casi risultano di sottostima, ma i prodotti da questa generati sono comunque utili, in quanto forniscono una valutazione dell'intensità di pioggia mediante un ulteriore strumento osservativo rispetto quelli attualmente



utilizzati (radar, pluviometri). È dunque possibile supporre che l'integrazione dei dati relativi alle scariche elettriche nei processi di fusione dei dati, a supporto della formulazione di previsioni a breve e brevissimo termine di precipitazioni convettive, possa risultare di significativo interesse in futuro.



Il Rischio Idrogeologico e gli Strumenti di Remote-Sensing

La Prevenzione del Rischio Idrogeologico

Le intense precipitazioni di natura convettiva che, negli ultimi anni, hanno colpito duramente il territorio nazionale (Figura 0.1), hanno fatto emergere l'importanza delle attività di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico, più di quanto questa fosse riconosciuta in passato.



Figura 0.1 - Evento alluvionale verificatosi nel Cuneese, ottobre 2020.

Nell'ambito del rischio idrogeologico rientrano gli effetti al suolo determinati da condizioni meteorologiche avverse e dall'azione delle acque (superficiali, in forma liquida o solida, o sotterranee), come ad esempio: frane, alluvioni, erosioni costiere, subsidenze e valanghe. Tra i fattori naturali, che predispongono il nostro territorio al verificarsi di fenomeni di dissesto idrogeologico, quelli di maggiore rilevanza sono la configurazione geologica e geomorfologica, caratterizzata da un'orografia complessa e bacini idrografici generalmente di piccola estensione, soggetti quindi a tempi di risposta alle precipitazioni estremamente brevi. Tra i fattori predisponenti non è meno rilevante è l'azione dell'uomo, come: la progressiva urbanizzazione, l'abbandono dei terreni montani, l'abusivismo edilizio, il continuo disboscamento, l'uso di tecniche agricole poco rispettose dell'ambiente e la mancata manutenzione dei versanti e dei corsi d'acqua. Questi ultimi, hanno causato un incremento della fragilità del territorio italiano, aumentando l'esposizione ai fenomeni di dissesto e quindi il rischio stesso.



Il verificarsi di eventi meteorologici di natura localizzata, che provocano la formazione di precipitazioni ingenti, che si esauriscono in brevi intervalli temporali, in corrispondenza di territori con le caratteristiche sopra citate, possono generare violenti effetti al suolo caratterizzati dalle cinematiche molto rapide, che sono la causa della maggior parte dei danni causati dalle intemperie nel territorio italiano. Tali eventi hanno un forte impatto sulle regioni densamente popolate della pianura settentrionale, che si acquiscono in corrispondenza della regione di confine tra la pianura e la catena alpina, dove la frequenza e l'intensità di questi eventi è molto elevata a causa della pendenza dei rilievi montuosi, che provoca il sollevamento forzato delle masse d'aria (sollevamento orografico).

La ricorrenza di eventi di dissesto idrogeologico, che hanno spesso determinato la perdita di vite umane e rilevanti danni ai beni, ha imposto nel corso del tempo l'adozione di una politica di gestione del rischio non più incentrata sulla riparazione dei danni e sull'erogazione di provvidenze, ma sull'individuazione delle condizioni di rischio e sull'adozione di interventi per la sua mitigazione, mediante misure preventive, strutturali e non strutturali, con lo scopo di raggiungere un livello definito "accettabile". In passato, si è cercato di raggiungere questo obiettivo mediante il solo impiego di interventi di tipo strutturale, pensando che la realizzazione di opere ed interventi, agenti sul fattore "pericolosità", fossero più efficaci rispetto ad eventuali provvedimenti di tipo non strutturale, operanti invece sul fattore "danno potenziale". Nel corso del tempo, però, si è compreso che, per la trattazione di questa tipologia di rischio, l'adozione di un approccio non esclude l'altro. Un'azione integrata delle due diverse tipologie di intervento è, infatti, l'unico modo per cercare di colmare le lacune intrinseche delle due tipologie di intervento, ottimizzandone i vantaggi. Oggi, provvedimenti normativi hanno imposto la perimetrazione delle aree a rischio, e si è sviluppato inoltre un sistema di allertamento e sorveglianza dei fenomeni che, assieme ad un'adeguata pianificazione comunale di protezione civile, rappresenta una risorsa fondamentale per la mitigazione del rischio, soprattutto dove non si riesce ad intervenire con misure strutturali, o dove queste ultime falliscono. Vi è, dunque, la consapevolezza che in quest'ambito, relativo al rischio idraulico ed idrogeologico, è fondamentale attuare una politica di gestione del rischio incardinata sull'attivazione di sistemi di allertamento efficienti ed efficaci, che si basano sull'osservazione e il monitoraggio continuo delle condizioni atmosferiche, finalizzato al controllo ed al preannuncio di possibili eventi dannosi sui territori. Per questo motivo, l'interesse relativo alla comprensione e alla previsione dei fenomeni convettivi, non riguarda soltanto la comunità scientifica, ma anche le amministrazioni locali, che devono garantire una condizione di sicurezza e incolumità nei confronti della propria popolazione.



Da ciò consegue che, oggi, lo svolgimento di queste attività trova sempre maggiore fondamento in un profondo legame tra l'ambito della protezione civile e quello della ricerca scientifica, con la messa a punto di nuovi strumenti tecnologici di raccolta e delle informazioni, centri di elaborazione dei dati in grado di segnalare con il massimo anticipo possibile le probabilità che si verifichino eventi catastrofici, e l'elaborazione di sofisticate ed efficienti cartografie di rischio.

La Previsione del Rischio Idrogeologico e il Radar Meteorologico

La gestione del sistema di allerta nazionale viene effettuata dal Dipartimento della Protezione Civile e dalle Regioni attraverso la rete dei Centri Funzionali (CFD), e dei Centri di Competenza (CC).

I Centri Funzionali assumono un ruolo principale nella catena dell'allertamento, svolgendo attività nel campo della previsione meteorologica, che ha come obiettivo quello di comprendere, preannunciare, monitorare, e sorvegliare in tempo reale, i fenomeni attesi, identificando gli scenari di rischio ad essi associati. I prodotti di questa attività sono trasmessi sotto forma di bollettini indirizzati alle strutture coinvolte, a vario livello, nel servizio nazionale di protezione civile. Nel caso di eventi, previsti o in atto, la cui intensità stimata o misurata superi delle soglie di criticità prefissate, essi permettono di attivare per tempo la macchina di protezione civile: il superamento di tali soglie porterà alla realizzazione delle attività previste nella pianificazione di emergenza e in particolare di quelle per la tutela dell'incolumità della popolazione.

La previsione delle condizioni meteorologiche, in relazione alle celle convettive, è un processo molto complesso. Su questa problematica, la comunità scientifica si è a lungo occupata, e tale dibattito ha portato ad una sempre maggiore comprensione dei fenomeni precipitativi e quelli ad essi correlati, ad uno sviluppo tecnologico per quanto riguarda gli strumenti di osservazione e l'implementazione di nuove metodologie di integrazione delle informazioni, provenienti da diverse fonti, per la produzione di accurate previsioni meteorologiche a breve termine (*nowcasting*). In particolare, un forte interesse è stato mostrato nei confronti della strumentazione radar meteorologica, che ha comportato una conseguente ottimizzazione di questa tecnologia.

Oggi, il radar meteorologico è caratterizzato da elevate qualità prestazionali in termini di monitoraggio dei fenomeni precipitativi, in quanto:



- Permette il rilevamento delle idrometeore (pioggia, neve, grandine o pioggia ghiacciata) presenti in atmosfera, distinguendone la natura e la relativa intensità, e il monitoraggio del moto e la previsione delle traiettorie future;
- L'informazione prodotta è di tipo continuo ed areale, e quindi fornisce una visione più dettagliata di fenomeni di precipitazione, quasi in tempo reale.

L'introduzione dell'informazione radar conduce, quindi, ad un livello di dettaglio dell'informazione migliore rispetto alle singole osservazioni satellitari, che permettono la rilevazione del *top* delle nubi, e la rete pluviometrica, che fornisce misure puntuali di altezze di pioggia. Nonostante gli eventuali errori, di natura meteorologica o strumentale, che possono compromettere la qualità dell'informazione radar, le caratteristiche, riportate in precedenza, hanno fatto sì che, nel corso del tempo, il radar sia diventato uno dei principali strumenti nel campo della stima e della previsione delle precipitazioni. Questa tipologia di informazione risulta particolarmente importante, poiché permette l'osservazione di fenomeni che rischiano di sfuggire all'osservazione delle reti di monitoraggio al suolo, in particolare, in caso di reti poco dense, superando quindi i limiti intrinseci della natura puntuale delle misurazioni pluviometriche, spesso poco rappresentative di ciò che effettivamente avviene su un intero bacino idrografico.

L'informazione, prodotta dal radar meteorologico, è stata adottata anche dal Dipartimento di Protezione Civile, con lo scopo di ottimizzare le proprie capacità di monitoraggio e sorveglianza dei fenomeni atmosferici su scala nazionale, ventiquattrore su ventiquattro. Inoltre, per sfruttare le potenzialità dell'informazione radar, la Protezione Civile, ha sviluppato e gestisce attualmente il progetto della rete radar su scala nazionale (RRN) (Figura I.2), costituita complessivamente da trenta radar meteorologici distribuiti sull'intero territorio nazionale, la cui interconnessione e fusione di dati in tempo reale permette di attuare un processo di mosaicatura delle informazioni, per garantire una efficace e continua attività di monitoraggio dei diversi fenomeni atmosferici.

La necessità di realizzazione di una rete deriva dal fatto che l'integrazione dei dati provenienti da una moltitudine di stazioni permette di migliorare l'efficienza di monitoraggio su ampia scala, minimizzando le criticità che minano le prestazioni e le misurazioni ottenute dal singolo strumento. Infatti, l'utilizzo di un solo radar comporta una serie di problematiche che ne limitano l'efficacia, riconducibili ad anomalie tecnico-strumentali, alla complessità orografica del territorio ed alle caratteristiche fisiche del fenomeno meteorologico. I prodotti finali, derivanti dalla rete di infrastrutture, sono quotidianamente utilizzati, e integrati con quelli generati dalle altre reti di strumenti osservativi, tra cui le stazioni pluviometriche e satellitari, con lo scopo di limitare la variabilità della qualità dell'informazione, specialmente in territori orograficamente



complessi, ed una volta elaborati e convalidati, sono tradotti in una utile informazione ai fini dell'allertamento.

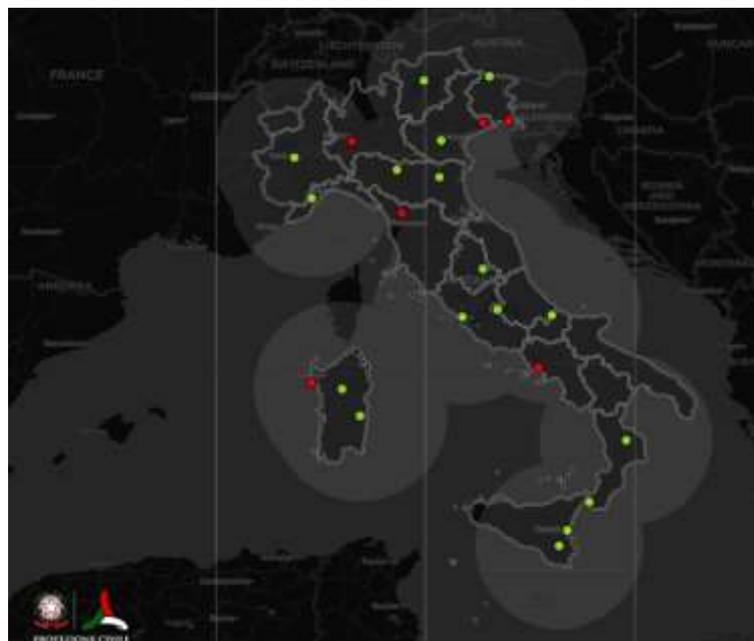


Figura 1.2 - Rappresentazione della copertura territoriale della RRN gestita dal Dipartimento di Protezione Civile, in cui si evidenziano: l'ubicazione delle stazioni radar e lo stato di funzionamento in tempo reale (in rosso, assenza di funzionamento, in verde, regolare funzionamento).



I sistemi Radar-Pluviometro: Eventi Convettivi in Piccoli Bacini Idrografici

In generale, l'informazione radar non viene utilizzata singolarmente, ma per superarne le limitazioni, derivanti dalle numerose fonti di errore da cui questa può essere affetta, si procede mediante l'integrazione di dati provenienti da altri strumenti di osservazione, come la rete delle stazioni pluviometriche.

L'importanza dei sistemi integrati radar-pluviometro è stata più volte documentata in letteratura scientifica. Nel presente lavoro, però, si vogliono riportare le considerazioni effettuate da Gabriele et al., (2017) in cui si prende in considerazione un caso particolarmente affetto da criticità, ovvero il verificarsi di eventi convettivi, di estensione fortemente limitata, che si abbattano su territori relativi a piccoli e piccolissimi bacini idrografici.

Questi episodi di pioggia, in corrispondenza di bacini di piccola entità, sono infatti responsabili di ingenti effetti al suolo, come l'innesco di frane e di alluvioni, più violenti rispetto a quelli che possono colpire bacini di estensione maggiore, per il repentino sviluppo con cui questi avvengono e le rapide cinematiche che caratterizzano gli effetti al suolo. Inoltre, l'elevata variabilità spaziale e temporale delle piogge, a carattere convettivo, influenza fortemente le previsioni, e le incertezze relative al campo di precipitazione si propagano in modo critico sulla determinazione delle portate, che di conseguenza inficia sia la qualità della progettazione delle opere idrauliche, sia la correttezza delle valutazioni in merito al rischio residuo, gli interventi di prevenzione e mitigazione del rischio. Infatti, in presenza di questa tipologia di fenomeni, i campi di pioggia ottenuti a partire dai pluviometri non forniscono, nella maggior parte dei casi, un'informazione adeguata: il numero di eventi pluviometrici brevi ma intensi che possono sfuggire alla rilevazione pluviometrica è tutt'altro che trascurabile. Le reti pluviometriche attualmente presenti, riescono a rilevare eventi di precipitazioni estreme con caratteristiche meteorologiche frontali di lunga durata, ma difficilmente individuano precipitazioni di tipo convettivo, che coinvolgono generalmente estensioni di poche decine di chilometri.

In Gabriele et al., (2017) si evidenzia il limite delle procedure impiegate nella valutazione delle massime portate al colmo di piena in bacini di piccole e piccolissime dimensioni, che si basano sull'utilizzo dei soli dati pluviometrici, poco rappresentativi delle precipitazioni convettive che interessano piccoli bacini idrografici, e che comportano valutazioni fuorvianti delle portate al colmo di piena. Si sottolinea invece come, nell'analisi di piccoli bacini, l'uso dell'informazione proveniente dalla rete radar (che, ad oggi, riesce a coprire quasi interamente il territorio italiano) e l'implementazione di metodologie combinate radar-pluviometro, in cui l'informazione acquisita



dai radar meteorologici viene costantemente integrata con il dato pluviometrico, rivestano un'importanza fondamentale per la corretta valutazione del campo delle precipitazioni, permettendo di monitorare con precisione la variabilità spaziale e temporale dei fenomeni, e di superare le criticità delle metodologie basata sulle misurazioni delle altezze di pioggia, citate in precedenza.

Ottimizzazione dell'Informazione del Radar Meteo e l'Introduzione del Dato delle Fulminazioni

Il radar è uno strumento di *remote-sensing*, che ha assunto nel corso del tempo un ruolo fondamentale nell'elaborazione di previsioni a breve termine, grazie all'elevata risoluzione spaziale e temporale, e la possibilità di ottenere informazioni, di natura qualitativa e quantitativa, dei fenomeni precipitativi presenti in atmosfera. Il radar, però, non effettua una misura diretta dell'intensità di precipitazione, ma la stessa può essere stimata a partire da una misura della riflettività delle idrometeore. Per trasformare il valore di riflettività (Z) in stima dell'intensità di precipitazioni (R), è necessario procedere con l'implementazione di relazioni empiriche di tipo esponenziale, i cui parametri caratteristici sono dipendenti dalle caratteristiche delle idrometeore e dagli eventi analizzati. In relazione alla determinazione di questi coefficienti si sono susseguiti numerosi studi scientifici, che hanno cercato di definirli in maniera empirica a partire dall'analisi dei dati di precipitazione e riflettività di eventi precedenti, ottenendo però dei valori costanti fortemente dipendenti dall'area geografia, dagli eventi considerati, e dalle caratteristiche del *dataset* di partenza.

Oggi, nelle attività svolte dai Centri Funzionali si utilizza la legge empirica Z-R proposta in Marshall&Palmer (1948). L'applicazione di questa relazione è un'operazione che permette una conversione della riflettività in valore di pioggia con un onere computazionale poco rilevante, ma che comporta numerose criticità dettate dal fatto che i parametri caratteristici (a , b) sono costanti nel tempo e nello spazio, e non direttamente calibrati a partire da dati di eventi accaduti sul territorio considerato. In questo lavoro di tesi, si è valutata la possibilità di ottenere un miglioramento della stima delle precipitazioni, mediante l'impiego di un diverso tipo di approccio di stima di tipo "adattativo", in cui si tiene conto durante l'evoluzione dell'evento della variabilità spaziale e temporale dei parametri. Tale metodologia, identificata nel metodo ATS (2015) viene applicata ad un caso studio, identificato negli eventi alluvionali che hanno colpito i territori del Basso Alessandrino nei giorni compresi tra il 19 e il 24 ottobre 2019. Una volta validati i risultati, e valutato la qualità dei dati restituiti dall'approccio "adattativo", il cui errore risulta accettabile, è stata messa a punto una nuova metodologia che a partire dai parametri puntuali di output del



metodo proposto da Libertino et al., (2015), permette di estendere la stima delle precipitazioni da un punto di vista areale, ottenendo quindi mappe di stima della distribuzione della pioggia. Tali mappe, sono soggette da un errore che nella maggior parte dei casi risulta di sottostima della precipitazione, ma permettono una ricostruzione accurata dei campi di pioggia, tenendo conto della variabilità spazio-temporale dei fenomeni precipitativi.

Inoltre, nel presente studio, si è valutata l'introduzione nel processo delle attività di previsione di un ulteriore fattore, identificato nelle fulminazioni. Tale informazione viene monitorata quotidianamente, ventiquattrore su ventiquattro, dalla rete di rilevamento *Lampinet* facente capo all'Aeronautica Militare, ma che non viene effettivamente ancora sfruttata nei modelli previsionali. L'osservazione dei processi di elettrificazione delle nubi, come il dato di riflettività delle idrometeore, non genera una misura diretta dell'altezza di pioggia, ma dal monitoraggio di questi è possibile ottenerne una stima. A partire dalle correlazioni tra il fenomeno delle fulminazioni e delle precipitazioni convettive, individuate in letteratura scientifica di tipo quantitativo, spaziale e temporale, si è effettuata un'analisi sulla base dei dati, relativi al caso studio preso in considerazione, per validare queste correlazioni anche in corrispondenza del territorio italiano. I risultati ottenuti possono essere considerati soddisfacenti, in quanto, l'osservazione delle fulminazioni, pur non essendo strettamente connessa al fenomeno delle precipitazioni, fornisce delle informazioni utili e con un breve anticipo, relativamente all'intensità e la posizione dei nuclei convettivi.

Oltre a valutare le potenzialità del dato dell'intensità delle fulminazioni, da impiegare come "predittore" per gli intensi eventi convettivi, si pone come obiettivo quello di identificare una metodologia che permetta una stima dei valori di precipitazione attesi a partire dal monitoraggio delle fulminazioni avvenute in un intervallo temporale precedente, in quanto, come documentato in letteratura, l'attività dei fulmini precede l'evoluzione delle precipitazioni. La stima prodotta risulta affetta da errori, ma i prodotti da questa generati sono comunque utili, in quanto forniscono una valutazione dell'intensità di pioggia e una ricostruzione della distribuzione, mediante uno strumento osservativo differente rispetto a quello radar, e pluviometrico, che può essere impiegato per mitigare gli errori e le limitazioni di quest'ultimo. È possibile, dunque, supporre la possibilità di inserimento dell'informazione relativa alle scariche elettriche nei processi di fusione ed integrazione dei dati, per la formulazione di previsione a brevissimo termine per la prevenzione del rischio idrogeologico.



Stima della Precipitazione Mediante Radar Meteorologico

La Relazione tra Riflettività e Intensità di Pioggia

Il funzionamento del radar meteorologico, in quanto strumento di telerilevamento “attivo”, si basa sull’emissione impulsiva, di un fascio di onde elettromagnetiche, che una volta investite le idrometeore presenti in atmosfera lungo la direzione di puntamento dell’antenna, viene retrodiffuso e quindi captato dall’apparato ricevente, per essere elaborato. Questo processo viene reiterato, con lo scopo di osservare i fenomeni atmosferici in atto, facendo variare, secondo intervalli temporali prefissati, la direzione di puntamento dell’antenna, identificata da: φ , angolo di azimut, e ϑ , angolo di elevazione. Il risultato di questa procedura è, quindi, una scansione di tipo volumetrico, in cui per ogni punto del volume identificato viene prodotta una misurazione della potenza captata dall’apparato ricevente dello strumento, e convenzionalmente espressa sotto forma di riflettività (Z).

Il dato registrato della strumentazione radar è, dunque, relativo alle caratteristiche del fascio di ritorno delle onde elettromagnetiche, che rispetto alla fase di emissione, subiscono un’alterazione, dovuta alla propagazione in atmosfera e all’interazione con le idrometeore. Infatti, la potenza dell’impulso elettromagnetico ricevuto (P_r), risulta dipendente dalla potenza del segnale trasmesso, dalle proprietà del bersaglio, dalle caratteristiche dello strumento adottato, e dalla distanza radar-bersaglio. Durante la fase di propagazione e di interazione, però, il segnale può essere soggetto a numerose fonti di errore, che possono determinare una riduzione della qualità dell’informazione dell’eco di ritorno, e generare valori di riflettività non ben correlati all’intensità e alle caratteristiche dell’evento atmosferico in atto.

Infatti, è necessario sottolineare che il dato fornito dalla rete radar, non è che una misura della riflettività delle idrometeore presenti in atmosfera. Lo strumento non effettua, quindi, una misura diretta di parametri meteorologici, e per ottenere informazioni di maggiore utilità e applicabilità in ambito idrometeorologico è necessario l’impiego di opportune metodologie, che permettono di ricondurre l’informazione radar in stima dell’intensità della precipitazione al suolo. La possibilità di convertire il dato di riflettività in un dato di pioggia deriva dal fatto che, la riflettività è direttamente proporzionale al numero e al diametro delle gocce di pioggia presenti in atmosfera, e sotto l’ipotesi di una distribuzione normale del diametro delle particelle, è possibile applicare una legge di potenza empirica Z - R (Equazione 2.1), caratterizzata dalla seguente forma:



$$Z = aR^b \quad (\text{Equazione 2.1})$$

Dove:

- R è l'intensità della precipitazione;
- Z è la riflettività;
- a e b sono i coefficienti legati alla distribuzione delle dimensioni e delle caratteristiche delle idrometeore.

Per ottenere una corretta conversione del dato di riflettività in intensità di pioggia è, dunque, necessaria la conoscenza della distribuzione dei diametri delle particelle d'acqua, dipendente dalla natura dell'evento atmosferico (stratiforme o convettivo) e dalle caratteristiche connesse al suo sviluppo, come già riconosciuto da Marshall&Palmer (1948). L'informazione relativa ai diametri delle particelle d'acqua, però, è di difficile reperimento, poiché le strumentazioni idonee a rilevare tale informazione sono spesso assenti o disposte in maniera non uniforme sul territorio, fornendo, dunque, delle informazioni di tipo puntuale poco rappresentative dell'intera area soggetta a copertura.

Dalla difficoltà di definizione di questa informazione, essendo i parametri soggetti ad un'elevata variabilità spazio-temporale, dovuta in gran parte al tipo di precipitazione, deriva l'incertezza nella stima dei parametri della relazione Z - R , e la conseguente determinazione del valore dei parametri a e b , deriva l'impossibilità di effettuare una stima esatta del campo della precipitazione mediante l'utilizzo dello strumento radar.

In letteratura, per far fronte al problema dell'identificazione dei parametri caratteristici, sono state proposte due metodologie di stima di pioggia, a partire dal dato di riflettività, che si basano su relazioni di natura differente:

- Le relazioni Z - R "non adattative", in cui i parametri a e b sono due costanti e rimangono fissi nel tempo e nello spazio;
- Le relazioni Z - R "adattative", in cui i parametri a e b che compaiono nella relazione Z - R non sono costanti ma variano nello spazio e nel tempo.



Metodologie di Stima Mediante Approccio “Non Adattativo”

La metodologia di stima delle precipitazioni mediante approccio “non adattativo”, in cui il dato del radar meteorologico viene convertito in intensità di pioggia attraverso l’applicazione di una legge Z-R a parametri fissi, è quella che tutt’oggi viene maggiormente utilizzata. Nonostante l’errore a cui è soggetta la stima, essendo a e b dei valori costanti, nel tempo e nello spazio, e quindi poco rappresentativi del reale sviluppo dei fenomeni atmosferici osservati, questa risulta comunque vantaggiosa poiché di semplice applicazione e poco onerosa dal punto di vista computazionale.

Il problema della determinazione delle costanti a e b , è uno dei più dibattuti in materia di radarmeteorologia, infatti, nonostante l’errore intrinseco che nasce dall’applicazione di una metodologia di stima a parametri fissi, durante il corso del tempo numerosi autori hanno ricercato di definirne un valore ottimale, che permetta di minimizzarlo. Per tale ragione, in letteratura sono documentati molteplici studi empirici che a partire dalla raccolta e il confronto dei dati pluviometrici, derivanti dalla rete di monitoraggio al suolo, e i corrispettivi valori di riflettività, individuati dalla rete di radar meteorologici, hanno definito numerose coppie di coefficienti a e b , da utilizzare per l’applicazione delle relazioni Z-R (Figura II.1). Tali studi, però, hanno proposto delle coppie di parametri che sono fortemente legati ai *dataset* di partenza impiegati per la calibrazione, alla loro numerosità e accuratezza, alle regioni considerate e loro caratteristiche climatologiche, e al numero e alla natura degli eventi sottoposti ad esame. Dunque, le relazioni individuate hanno una validità strettamente limitata al dominio di definizione della stessa, rendendo la relazione inadatta a qualsiasi uso operativo sistematico.

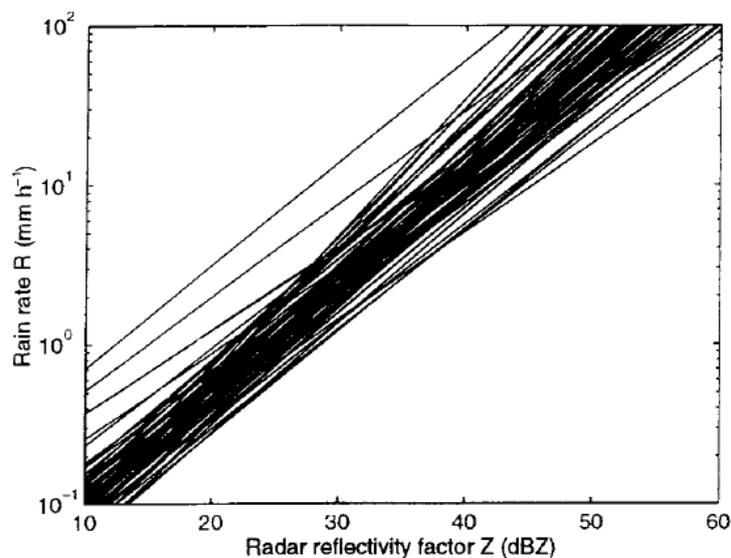


Figura 0.1 – Relazioni Z- R, proposte in letteratura scientifica.



Tra i numerosi tentativi di determinazione dei parametri caratteristici, sicuramente, quello di maggiore interesse per il territorio nazionale è la relazione di Marshall&Palmer (1948), quotidianamente utilizzata dal Dipartimento di Protezione Civile e dai suoi Centri Funzionali Decentrati.

Mentre, per quanto riguarda il territorio piemontese, è possibile citare il progetto FLORA (*FLood estimation in complex Orographic area for Risk mitigation in Alpine space*), redatto da Laio et al., (2012). In particolare, questo progetto si pone l'obiettivo di individuare nuovi strumenti e metodologie per migliorare la previsione, e quindi ridurre i rischi associati alle inondazioni improvvise in territori alpini, causate da precipitazioni che si verificano su bacini ad elevata pendenza. Tra gli strumenti valutati per l'incremento dell'accuratezza di questo tipo di previsioni, è stato identificato lo strumento radar meteorologico, in quanto garantendo un'estesa copertura e un monitoraggio continuo, può contribuire al miglioramento della stima delle altezze di pioggia, che vengono successivamente impiegate come dato di input nell'implementazione di modelli idrologici, incrementando, quindi, l'accuratezza della previsione di eventi alluvionali, dettate da eventi precipitativi localizzati e di forte intensità, in territori alpini caratterizzati da un'orografia complessa.

Per migliorare i risultati di stima, rispetto alle relazioni presenti in letteratura, viene proposta una legge Z-R i cui parametri fissi, sono ottimizzati per i territori della regione Piemonte, in particolare per la regione alpina. Per la definizione dei parametri, si è proceduto prendendo in considerazione gli eventi precipitativi maggiormente intensi (sia stratiformi che convettivi) avvenuti nel periodo 2003-2008, e i soli pluviometri ricadenti in porzioni di territorio in cui il fascio radar non risulta affetto da errori di natura orografica. Successivamente, sono stati identificati i parametri costanti a e b ($a=40.5$, $b=2.5$), di tipo regionale, che permettono di minimizzare il valore assoluto dello scarto tra precipitazione stimata ed osservata, e di minimizzare lo scarto per la precipitazione cumulata per ogni stazione. Inoltre, in tale lavoro di ricerca, viene delineata una metodologia per valutare l'incertezza della stima, mediante la quale è possibile individuare i bacini in cui è possibile affidarsi all'utilizzo del *remote-sensing*, senza che la stima della pioggia sia affetta da marcati errori.

Metodologie di Stima mediante Approccio “Adattativo”

L'adozione di una metodologia basata su una relazione a stima fissa, ovviamente, comporta delle limitazioni, infatti, per quanto questa possa essere ottimizzata per il territorio, o l'evento considerato, non riesce a cogliere il reale sviluppo dell'evento in corso o le peculiarità derivanti dalla sua configurazione.



Nell'ottica di miglioramento delle previsioni a breve termine, nel corso del tempo, la comunità scientifica ha spostato il proprio focus dalla definizione dei parametri costanti ottimizzati, regione per regione, e in base all'evento, verso lo sviluppo di metodologie "adattative", che per ogni evento precipitativo permettono la calibrazione dei parametri nel tempo reale, tenendo inoltre in considerazione la variabilità spaziale che può caratterizzare l'episodio, sia questo di natura convettiva o stratiforme.

Da queste considerazioni, hanno preso piede più studi finalizzati allo sviluppo di tecniche per la correzione e il miglioramento delle stime ottenibili a partire dal dato prodotto dal radar meteorologico, mediante una calibrazione che avviene in maniera dinamica nel tempo e nello spazio, garantendo quindi una precisione, in termini di adattamento tra i valori osservati e stimati, maggiore rispetto a quella che è possibile ottenere con i metodi "non adattativi", utilizzati comunemente, e un'indipendenza dal dominio di utilizzato per la taratura della relazione.

Questi metodi effettuano una calibrazione attraverso la fusione di flussi di dati, provenienti da radar meteo e stazioni pluviometriche, proponendo quindi una metodologia integrata radar-pluviometro, in cui le due misurazioni risultano complementari. Ovviamente, l'implementazione di questa tipologia di approccio estimativo non risulta esente da fattori di errore e limitazioni, infatti la calibrazione costante viene effettuata su campioni di dati molto ridotti, il che porta ad una maggiore influenza di possibili *outlayers*, e il fatto di lavorare su domini spaziali molto estesi rende la stima soggetta ad una forte influenza della variabilità spaziale dell'evento.

Alfieri et al. 2010

Tra le metodologie "adattative" proposte in letteratura scientifica, è possibile citare la tecnica di stima della precipitazione, sulla base del dato radar meteorologico, proposta da Alfieri et al., (2010). In questo studio, effettuato a scala locale, vengono presi in considerazione diciannove eventi, di natura mista, e un dominio spaziale centrato in corrispondenza del radar meteorologico posto in cima del Bric della Croce in Piemonte, con raggio di 25 km: regione in cui sono presenti venti stazioni pluviometriche della rete di monitoraggio al suolo, gestita da ARPA Piemonte.

La metodologia proposta si basa sulla definizione di una legge di potenza Z-R, i cui parametri vengono calibrati, in maniera costante, per ogni step temporale e per ognuna delle stazioni ricadenti nell'area considerata. La taratura avviene mediante un confronto di dati, di riflettività e pluviometrici, in corrispondenza di ogni pluviometro, grazie all'impiego di finestre temporali scorrevoli. Per integrare in un'unica metodologia queste informazioni, cercando di mitigare le discrepanze derivanti dalle modalità di acquisizione dei due differenti dati, vengono trattate nel seguente modo: le misure pluviometriche sono aggregate su una durata pari ad un'ora, mentre i



dati radar vengono mediati nel tempo e nello spazio, considerando i nove pixel, centrati sul pluviometro considerato e una durata corrispondente all'aggregazione scelta per i dati pluviometrici. La scelta di considerare intervalli pari ad un'ora permette di ottenere un numero maggiore di coppie precipitazione-riflettività, per ognuno degli step temporali, per la successiva definizione dei parametri a e b .

La metodologia di calibrazione proposta è possibile riassumerla mediante quattro step successivi:

1. In primo luogo, si procede con un processo di "pulitura" dei dati. Per ognuna delle venti stazioni, e per ogni istante t_i , vengono prese in considerazione soltanto le coppie di dati per cui si verificano due condizioni:
 - Il valore delle precipitazioni è diverso da zero;
 - Il valore di riflettività è al di sopra di un valore soglia, posto a 10 dBZ (eliminazione della "precipitazione di fondo").
2. Come valore di primo tentativo, una volta identificate le coppie di valori Z ed R valide, si procede con la definizione dei valori dei parametri a e b ottenuti mediante la relazione lineare (di *bulk adjustment*), (Equazione 2.2):

$$\log Z = \log \hat{a} + \hat{b} \log R \quad (\text{Equazione 2.2})$$

in cui \hat{a} e \hat{b} sono i parametri da stimare, a partire dalle coppie di valori nel piano Z-R.

3. Successivamente, in ogni istante t_i per definire le coppie di valori caratteristici per ogni stazione, si considerano tutte le coppie di dati "validi", di precipitazione e riflettività, ricadenti in una finestra temporale di durata d pari a un'ora, ($[t_{i-1}-d; t_{i-1}]$).

Per ogni step, è possibile stimare un numero di coppie di parametri quante sono le coppie di valori Z-R disponibili all'interno della finestra considerata. Si procede, quindi, con una definizione di un'unica coppia di parametri, mediante una procedura di cross validazione, identificandoli con quelli che minimizzano lo scarto quadratico tra precipitazione osservata e quella stimata ottenuta con la seguente formula, (Equazione 2.3):

$$R_{stim} = 10^{\frac{Z^*}{10\hat{b}} - \frac{\log_{10} \hat{a}}{\hat{b}}} \quad (\text{Equazione 2.3})$$

in cui $Z^* = 10 \log Z$ [dBZ]

4. Nel caso in cui, all'interno della finestra di durata selezionata, non sia possibile individuare una relazione valida a causa di un insufficiente numero di coppie Z-R valide o perché i valori stimati di a e b ricadono al di fuori dei limiti imposti ($a > 1$, $b > 1$), viene utilizzata la relazione valida nell'intervallo più vicino nel tempo.



Nel caso in cui nessuna delle finestre disponibili fornisse un risultato valido viene utilizzata la relazione definita *bulk adjustment* (Equazione 2.2), su un campione di eventi di diverso tipo, limitatamente all'area in analisi.

Tecnica adattiva nello spazio e nel tempo ATS (2015)

La tecnica adattativa nel tempo e nello spazio, proposta da Libertino et al., (2015), prende spunto dalla metodologia individuata da Alfieri et al., (2010), ottimizzandola e ampliandone la scala spaziale di applicazione, e integrata con i risultati individuati dal progetto FLORA (2012),

L'obiettivo di questa metodologia è quello di stimare le precipitazioni a partire dall'uso combinato dei pluviometri e dei radar, tenendo conto dell'estrema variabilità a cui è soggetta la legge di potenza Z-R, nel tempo e nello spazio.

Per far fronte a questa variabilità, la tecnica ATS (2015) si basa sulla definizione dinamica di domini spaziali e temporali per la calibrazione dei parametri caratteristici. Il dominio temporale è costituito da una finestra di calibrazione, che agisce nel tempo reale, in cui per ogni istante t_i , è caratterizzata da un'ampiezza pari a $[t_{i-1}-d; t_{i-1}]$, in cui d risulta pari ad un'ora per garantire la robustezza della stima, Figura II.2.

Ogni dominio spaziale di calibrazione della relazione Z-R è, invece, definito dai 20 pluviometri più vicini ad ogni punto considerato. Per ognuna delle venti stazioni, e per ogni istante t_i , vengono prese in considerazione soltanto le coppie di dati per cui si verificano due condizioni:

- Il valore delle precipitazioni è diverso da zero;
- Il valore di riflettività è al di sopra di un valore soglia.

Tale procedura di "revisione sistematica" è anch'essa di tipo adattativo, poiché il valore Z_{soglia} non è di tipo fisso, come nella procedura di Alfieri et al. (2010). La soglia è calibrata per ogni t_i selezionando i soli pluviometri che hanno registrato precipitazione nulla all'istante t_{i-1} , ed è definito come il quantile (con la probabilità cumulata q) della distribuzione empirica dei dati di riflettività associati ai pluviometri selezionati, fissato pari a 0.85.

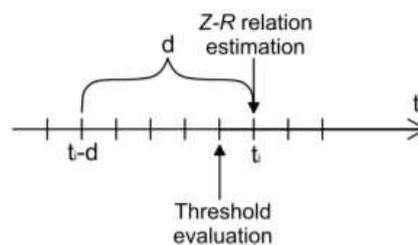


Figura 0.2 - Rappresentazione schematica del dominio temporale per la stima della relazione Z-R (da Libertino et al., 2015).



Se successivamente alla fase di “ripulitura” dei dati, non si raggiunge un numero pari a N (fissato a 20) di coppie di dati Z-R, si procede con una stima effettuata sui dati disponibili e si prova comunque ad ottenere una stima dei coefficienti.

Per quanto riguarda il procedimento di stima, questo risulta molto simile a quello proposto da Alfieri et al. (2010). Infatti, la tecnica adattativa, nell'istante iniziale, effettua una stima, ottenendo dei valori di primo tentativo, mediante una relazione di *bulk adjustment*, che in questo caso è la relazione Z-R proposta per il Piemonte dal FLORA. Mentre, negli istanti successivi, si procede con una calibrazione dei parametri che avviene nel tempo reale, per ogni istante t_i , basandosi sulle coppie di valori Z ed R rilevati nell'intervallo temporale, di durata d .

La definizione dei coefficienti, che avviene mediante la traslazione della finestra temporale, viene effettuata in corrispondenza di ogni stazione, minimizzando lo scarto quadratico tra i valori osservati e i valori stimati, utilizzando la seguente formula (Equazione 2.4):

$$\hat{R} = 10 \left(\frac{Z^* - Z_{soglia}^*}{10^b} \right) - \frac{\log_{10} \hat{a}}{b} \quad (\text{Equazione 2.4.})$$

Dove:

- \hat{a} e \hat{b} sono i coefficienti stimati;
- Z^* il dato di riflettività misurato (dBZ), $Z^* = 10 \log_{10} Z$.

L'identificazione dei valori di a e b , e la successiva verifica sono condotti mediante una procedura di cross-validazione in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica, escludendo un pluviometro alla volta dalla valutazione dei coefficienti della Z-R, e successivamente, comparando il valore stimato con la precipitazione effettivamente misurata nella realtà dal pluviometro escluso inizialmente. Se la stima non risulta robusta (cioè non converge dopo un certo numero di iterazioni, 400) si utilizza la relazione di *bulk adjustment*.

In questo lavoro di tesi si è deciso di procedere con una valutazione della reale capacità di stima di questa metodologia “adattativa”. Nei capitoli seguenti, si riportano, infatti, i risultati della sua applicazione, che sono stati soggetti ad una validazione mediante un confronto con le osservazioni pluviometriche e la misurazione radar, che sono state effettuate durante l'evento preso in esame: l'evento alluvionale del Basso Alessandrino, dell'ottobre 2019. Inoltre, per valutarne l'accuratezza della metodologia adottata, si è scelto di impiegare i risultati forniti per effettuare la ricostruzione dei campi di pioggia, che si è verificata nei giorni considerati.



Le Fulminazioni e i Fenomeni Convettivi

Introduzione

Nel corso degli anni, all'incirca a partire dagli anni Quaranta, è incrementato l'interesse scientifico nei confronti del fenomeno delle fulminazioni, per tale ragione, numerose ricerche scientifiche sono state effettuate al fine di investigare e migliorare la comprensione di tale fenomenologia e la sua relazione, di natura qualitativa e quantitativa, con le precipitazioni di natura convettiva. Attualmente, ancora molti sono gli studi di ricerca incentrati su questa tematica, ma il focus della ricerca si spostato dalla mera comprensione dei processi di elettrificazione delle nubi, investigata e documentata abbondantemente nei decenni antecedenti, verso le possibili applicazioni operative del dato relativo alle scariche elettriche. Oggi, la sfida dei ricercatori è quella di sfruttare le informazioni dalle reti di monitoraggio delle fulminazioni per applicazioni relative alla previsione e il monitoraggio dei sistemi temporaleschi.

Infatti, il fulmine è un fenomeno relativamente facile da misurare e monitorare, usando solo poche stazioni di monitoraggio, il cui costo d'installazione e mantenimento risulta modesto (rispetto alla tecnologia satellitare e radar), è possibile ottenere un monitoraggio in tempo reale delle fenomenologie in atto, grazie ad una copertura, da un punto di vista spaziale, estesa ed uniforme, e una buona risoluzione temporale, determinata da un'elevata velocità di ritorno dell'informazione. Le osservazioni delle fulminazioni possono essere effettuate, senza essere soggette a numerose fonti di errori da grandi distanze, mediante la propagazione del segnale sotto forma di onde di superficie. Oggi, infatti, le reti maggiormente utilizzate lavorano sfruttando la propagazione delle onde elettromagnetiche nelle basse (LF) o bassissime frequenze (VLF), permettendo un rilevamento dell'attività elettrica "a lungo raggio", a scala nazionale o continentale. Il limite di queste strumentazioni è dettato dal fatto che, le uniche scariche ad essere registrate sono quelle che si verificano tra nube e suolo, ma per far fronte a questa criticità è possibile ricorrere ad un utilizzo congiunto con le osservazioni satellitari, che permettono di individuare anche la frazione di scariche che si verifica all'interno dei corpi nuvolosi (*intracloud*), senza far ricorso a onerosissime reti operanti nel range del VHF.

Nei paragrafi successivi, si intende riassumere le principali relazioni che intercorrono tra il fenomeno delle fulminazioni e le precipitazioni convettive, che sono state messe in luce nella letteratura scientifica, e che permettono di supporre un uso operativo dell'informazione dell'attività delle scariche elettriche, ottenuta mediante i sistemi di rilevamento a terra ad oggi presenti ed operativi, poter identificare, tracciare i nuclei convettivi al fine di formulare previsioni



meteo per il brevissimo termine ed eventuali messaggi di allerta meteo per le applicazioni di protezione civile, in relazione ad eventuali fenomeni precipitativi intensi in formazione, e di integrarla con i dati già attualmente utilizzati dai Centri Funzionali delle Protezione Civile.

Relazione Temporale e Spaziale tra Fulminazioni e Precipitazioni Convettive

Essendo l'obiettivo di molte ricerche scientifiche quello di individuare una metodologia, che a partire dall'osservazione del dato delle fulminazioni e in combinazione ad altre tipologie di dati (esempio dato radar, satellitare ed ecc..) permetta di stimare e prevedere nel breve termine le precipitazioni convettive, il primo passo effettuato da molti ricercatori è stato quello di valutare un'eventuale analogia in termini di distribuzione spaziale ed evoluzione temporale tra questi due fenomeni. Tra i numerosi studi, riportati in letteratura scientifica, che si sono susseguiti nel corso del tempo su questa tematica è possibile citare Tapla et al., (1998) e Soula&Chauzy (2001), in cui viene indagata la connessione tra il fenomeno delle fulminazioni e gli eventi convettivi. In questi lavori di ricerca, per ogni evento temporalesco preso in esame, viene effettuata un'analisi valutando i dati relativi alla frequenza delle fulminazioni e l'intensità delle precipitazioni, a carattere temporalesco.

Da un punto di vista spaziale, dal confronto delle mappe delle fulminazioni e dalle osservazioni di riflettività del radar meteorologico, si osserva una buona corrispondenza nella distribuzione spaziale tra le regioni, caratterizzate da precipitazioni maggiormente intense, e le aree in cui è presente un'elevata densità di scariche elettriche *cloud-to-ground* (CG). In generale, è stato documentato però che i nuclei dei due fenomeni non coincidono esattamente, ma l'area con più alta densità dei fenomeni elettrici si verifica perimetralmente all'area delle precipitazioni più ingenti, infatti la fulminazione tende ad evitare la regione a più alta riflettività, verificandosi appena al di fuori di questa lungo l'intera durata ed evoluzione dell'evento temporalesco.

Da un punto di vista temporale, invece, è stato osservato che l'evoluzione dei due fenomeni avviene in maniera parallela, ed è dunque ben correlata, si riconosce, infatti, un andamento simile in fase crescente e di picco, mentre in fase di dissipazione, questi risultano maggiormente "slegati". Solitamente, l'attività dei fulmini termina prima della fase terminale e stratiforme della pioggia, generando una scarsa correlazione tra frequenza dei fulmini e intensità di pioggia verso la fine della fase della dissipazione. Di particolare interesse, al fine di utilizzare operativamente il dato delle fulminazioni, è, sicuramente, il ritardo significativo (*lag-time*), che sia Tapla et al., (1998) che Soula&Chauzy (2001) hanno identificato tra il picco dell'attività delle scariche elettriche e il picco delle precipitazioni.



Tale ritardo varia da pochi minuti fino a quasi mezz'ora, e sembra incrementare con l'intensità del fenomeno, in quanto è stato osservato che gli eventi temporaleschi caratterizzati da un numero maggiore di scariche elettriche (CG) e da precipitazioni più consistenti, tendono a produrre tempi di latenza più lunghi, eventi meno intensi, al contrario, sono caratterizzati da intervalli di latenza minori. Il ritardo, identificato dai diversi studi sopra citati, è stato spiegato da Piepgrass & Krider, (1982) facendo riferimento alla dinamica delle particelle d'acqua, presenti all'interno della struttura delle nubi temporalesche. Infatti, i cumulonembi, i quali sono solitamente accompagnati dall'attività elettrica, sono caratterizzati da elevato sviluppo verticale, ed elevate velocità relative ai moti ascensionali, che trasportano particelle d'acqua ad altitudini elevate, dove rimangono a lungo sospese prima di precipitare al suolo percorrendo una distanza maggiore. Pertanto, è ragionevole supporre che al crescere dell'intensità degli eventi temporaleschi, incrementi lo sviluppo verticale del corpo del cumulonembo, e di conseguenza il tempo di latenza si dilati, in quanto connesso ad un maggiore "sollevamento" delle idrometeore.

Relazione Quantitativa tra Scariche Elettriche e Precipitazioni

Nel corso degli anni numerosi autori, valutando il fenomeno delle fulminazioni e la loro connessione ai fenomeni temporaleschi, hanno individuato inoltre una correlazione tra intensità di precipitazioni e la frequenza del verificarsi delle scariche elettriche. Già nei primi anni '60 Battan, (1965), una volta individuata tale connessione da un punto di vista qualitativo, ha cercato di quantificarla introducendo un fattore che mettesse in relazione i millimetri di precipitazione (solida e/o liquida) che corrispondono ad ogni scarica elettrica rilevata. In seguito, altri autori si sono interrogati sulla definizione di questo fattore, successivamente denominato "RLR – *Rainfall Lightning Ratio*", e definito come il rapporto tra la massa della pioggia e il numero di scariche nube-terra, che si verificano su un'area di riferimento in un determinato intervallo di tempo.

I vari studi, che si sono susseguiti nel corso del tempo, hanno identificato valori molto differenti fra loro, in relazione agli eventi, i territori, le caratteristiche climatiche, e numerosi altri fattori che sono stati sottoposti ad esame, facendo emergere così la stretta dipendenza di questo parametro dal *dataset* utilizzato per la sua identificazione. Sulla variabilità di questo fattore si è incentrato il lavoro di ricerca di svariati autori. Ad esempio, secondo Petersen & Rutledge, (1998) e Soriano et al., (2001) tale rapporto dipende fortemente dalla regione geografica e dal regime delle piogge e climatico, in particolare: la massa delle precipitazioni per scarica elettrica (CG) è minore per le regioni aride e maggiore per le regioni umide (Figura III.1)

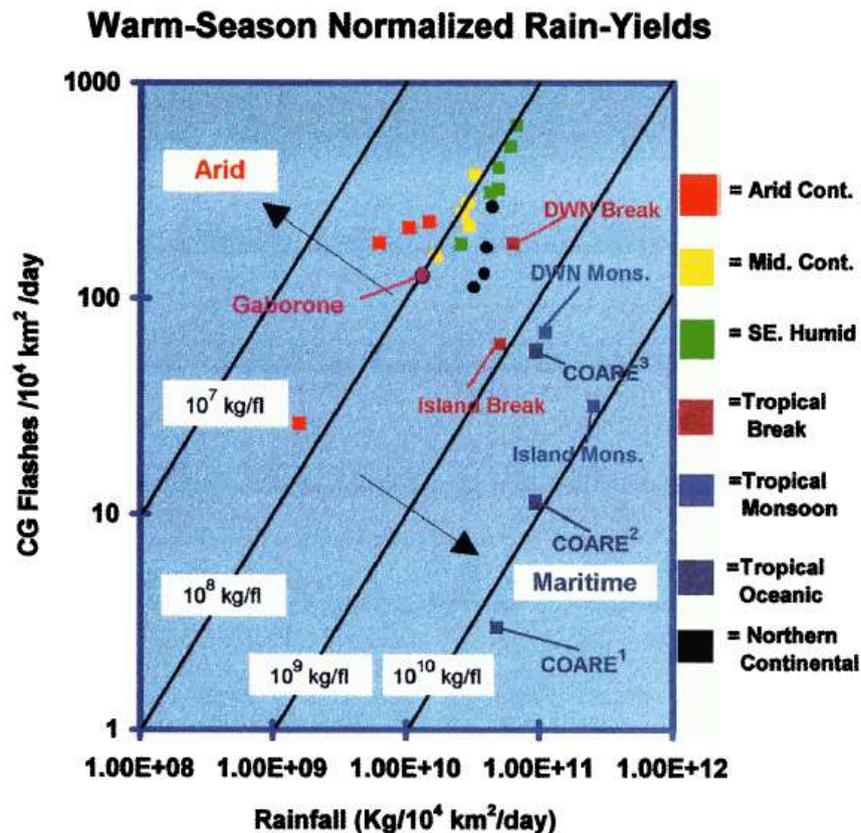


Figura 0.1 – Variabilità del fattore RLR in base al regime climatico. Da Petersen&Rutledge, 1998.

Mentre, secondo Tapla et al., (1998), oltre alla regione climatica e geografica, il fattore RLR dipende dall'intensità del fenomeno temporalesco. In particolare, secondo lo studio in questione, questo coefficiente decresce al crescere dell'intensità delle precipitazioni e della frequenza delle scariche, variando quindi da evento da evento in evento, e durante l'evoluzione dell'evento stesso. Infatti, ogni episodio precipitativo è possibile suddividerlo in tre diverse fasi: maturazione, picco e dissipazione. Durante la fase di crescita, in cui si osserva l'incremento della frequenza delle fulminazioni e l'intensità di pioggia, la massa delle precipitazioni per scarica ed elettrica decresce. Una volta che l'evento raggiunge fase di picco, in cui la nube raggiunge il suo massimo sviluppo verticale, l'RLR raggiunge il valore minimo. Nella fase di decrescita la frequenza delle fulminazioni diminuisce più rapidamente di come decresce la precipitazione, producendo valori di RLR più alti. Un altro fattore che è stato preso in considerazione in Soula&Chauzy (2001) è la polarità delle scariche elettriche, in tale studio dall'analisi dei sistemi convettivi presi in esame, emerge un incremento di questo coefficiente in relazione ad un incremento della percentuale delle scariche a polarità positiva (Figura III.2), sostenendo, quindi, una distinzione necessaria del parametro associato alle scariche elettriche, con lo scopo di ottenere un miglioramento della stima della precipitazione.

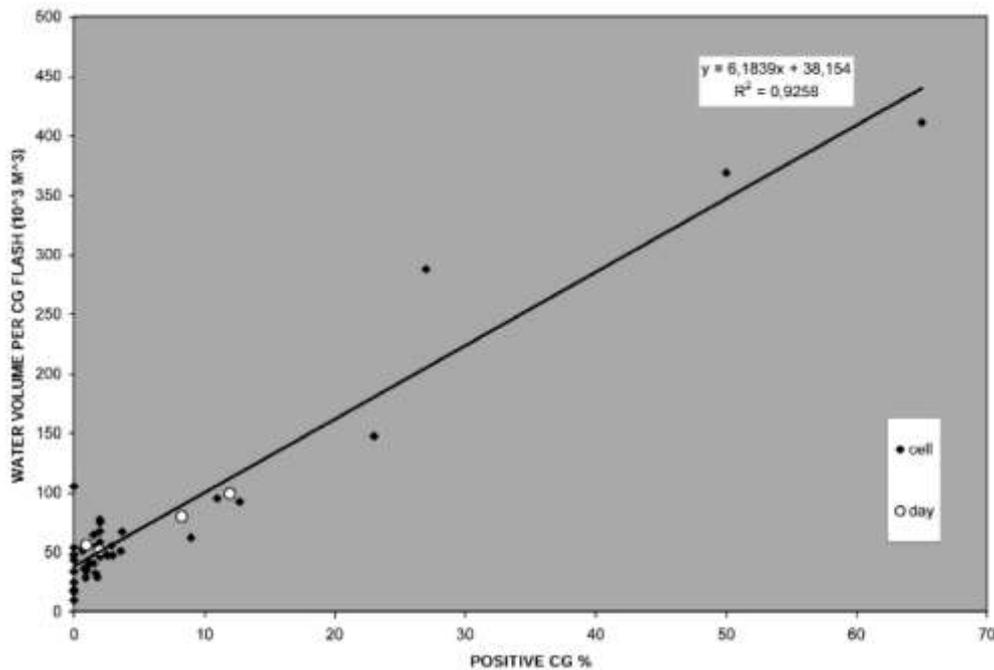


Figura 0.2 - Distribuzione del fattore RLR, a scala di evento, in relazione alla percentuale delle scariche elettriche positive registrate.

Stima delle precipitazioni con modelli basati sul fattore RLR

Una volta aver identificato il valore del fattore RLR ottimale per il territorio di interesse, molti studi di ricerca sono stati effettuati per valutare l'effettiva potenzialità di quest'ultimo nell'ambito della stima delle precipitazioni. Tra i modelli, che sono stati documentati in letteratura, di stima delle precipitazioni convettive, a partire dall'osservazione delle scariche elettriche, è possibile citare quello proposto in Tapla et al., (1998), (Equazione 3.1). In questo studio, sulla base di un'analisi di ventidue eventi convettivi avvenuti a Melbourne (Florida), viene individuato un valore di RLR mediano per la regione di interesse e da questo successivamente, applicandolo ad ognuna delle scariche elettriche (CG) rilevate dalla rete di monitoraggio, si procede con la ricostruzione dei campi di pioggia degli eventi presi in esame. In Tapla et al., (1998) si propone, inoltre, una metodologia di validazione dei risultati in cui si mettono a confronto le mappe delle precipitazioni, derivanti dalle osservazioni radar, e quelle derivanti dalle osservazioni delle scariche nube-suolo, Figura III.3.

Dall'analisi comparativa, emerge che il modello basato sul parametro RLR riesce ad individuare bene le aree dove la pioggia è intensa, mentre le aree ad elevata e moderata intensità sono soggette rispettivamente ad un errore di sovrastima e di sottostima.



Ovviamente, questa limitazione è dettata da un impiego di un RLR che non varia al variare dell'intensità del fenomeno, ma è un valore costante medio. Nonostante le limitazioni e le approssimazioni del modello impiegato, viene individuata, però, una buona corrispondenza tra la distribuzione dell'intensità di pioggia individuata mediante l'utilizzo del dato radar e quella fornita dall'osservazione delle fulminazioni. Si riporta di seguito la metodologia riportata in Tapla et al. (1998), in cui per ogni scarica elettrica si considera un'area di influenza di raggio pari a 5 km e un intervallo temporale pari a 5 min.

$$R(t, x) = C \sum_{i=1}^{N_t} Z f(t, T_i) g(x, X_i) \quad (\text{Equazione 3.1})$$

$$f(t, T_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } |t - T_i| < \Delta t/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad g(x, X_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } |x - X_i| < 5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Dove:

- $R(t, x)$ è la precipitazione al tempo t e nel punto x ;
- N_t è il numero di scariche elettriche registrate nell'intervallo $t + \Delta t/2$;
- T_i è il tempo di accadimento della i -esima scarica elettrica;
- X_i è la posizione della i -esima scarica elettrica;
- Z è il fattore RLR;
- C è un fattore di conversione.

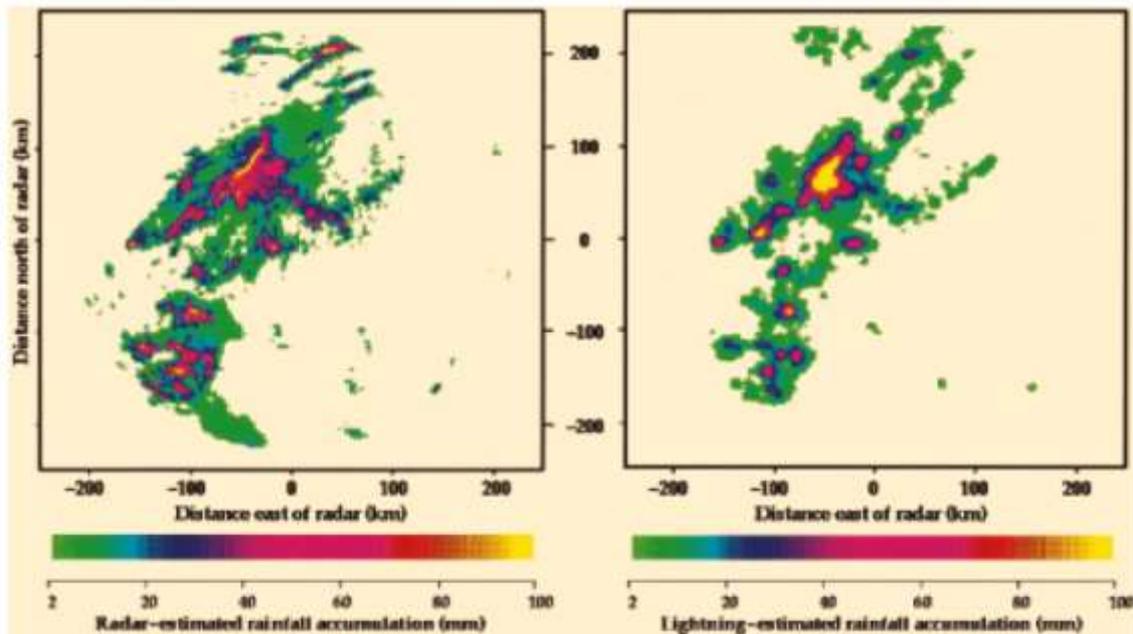


Figura 0.3 - Mappe delle precipitazioni stimate dal radar e stimate mediante il modello di Tapla et al. 1998.



Questa metodologia, è stata successivamente ripresa e ottimizzata da Soula&Chauzy (2001). Infatti, quest'ultimi nel loro lavoro di ricerca evidenziano l'importanza della distinzione del parametro RLR, per le fulminazioni a polarità positiva e negativa, e dunque propongono un modello che ricalca esattamente quello citato in precedenza, a parte il fatto che anziché essere presente un unico parametro RLR, se ne identificano due differenti da applicare in base alla polarità del fenomeno elettrico rilevato.



L'evento Alluvionale del 19-24 Ottobre 2019 in Piemonte

Introduzione

In questo capitolo si intende procedere con la ricostruzione e l'analisi dell'evento che nell'ottobre del 2019 ha duramente colpito i territori del Piemonte e della Liguria, L'area, oggetto dell'interesse di questo lavoro, è quella posta sullo spartiacque tra il Piemonte e la Liguria, una regione che nel corso del tempo è stata soggetta a numerosi eventi precipitativi di straordinaria intensità, che hanno generato importanti effetti al suolo.

L'evento in esame si è verificato nell'intervallo temporale compreso tra il 19 e il 24 ottobre 2019, giorni in cui i territori italiani del Nord-Ovest sono stati interessati da una intensa perturbazione atlantica centrata sulla Spagna, che convogliando correnti umide provenienti da Sud-Est, ha generato intense condizioni di maltempo. In particolare, i territori settentrionali sono stati soggetti a precipitazioni a carattere avvertivo e concentrate nei primi giorni dell'evento, mentre le precipitazioni, verificatesi sui territori meridionali, sono state a carattere convettivo anche sotto forma di sistema temporalesco organizzato, e si sono verificate a più riprese durante i giorni interessati. Il culmine dell'evento in esame è sicuramente possibile identificarlo nel pomeriggio del 21 ottobre, quando, nei pressi del Golfo Ligure, si è generato un sistema temporalesco, autorigenerante, stazionario, caratterizzato da precipitazioni convettive di rara violenza, detto *V-shaped thunderstorm*. Successivamente al suo innesco, in cui ha giocato un ruolo primario la convergenza dei forti venti caldi da Sud-Est e le correnti settentrionali fredde, provenienti dal bacino padano verso il Mar Ligure, tale struttura si è spostata velocemente dal Mar Ligure verso la provincia di Alessandria, dove è perdurata nel territorio compreso compresa tra Ovada, Novi, Gavi e Tortona, generando piogge di intensità elevata per circa dodici ore. Centro di scroscio dell'evento è stato identificato in corrispondenza del comune di Gavi (AL), che in dodici ore, è stata soggetta ad una precipitazione di ben 428 mm, un primato di intensità per l'intera rete di stazioni meteorologiche in telemisura del Piemonte (gestita da ARPA Piemonte).

Questi eccezionali quantitativi, la cui entità è risultata all'incirca pari alla metà della pioggia che mediamente si registra in un anno in questi territori, concentrati in un così breve arco temporale e verificatisi su un terreno già saturo dalle piogge dei giorni precedenti, sono stati responsabili di innumerevoli frane e smottamenti ed hanno provocato una rapida risposta del reticolo idrografico minore causando un innalzamento repentino dei livelli idrometrici e piene eccezionali, di rii e



torrenti prima, e torrenti principali successivamente, con effetti devastanti sul territorio e sulla popolazione.

La scelta di analizzare questo evento alluvionale è stata dettata dalla sua eccezionalità in termini di intensità, e gravità relativamente all'impatto al suolo da esso causato sui territori colpiti, in corrispondenza della Provincia di Alessandria, e in particolare nei territori del Basso Alessandrino. L'entità, infatti, di tale fenomeno è paragonabile a quella degli eventi che più duramente hanno colpito il Piemonte negli ultimi anni, le alluvioni dell'ottobre e novembre del 2014, eventi eccezionali, per intensità e per effetti al suolo provocati, che nella stessa stagione e con le modalità simili hanno coinvolto i medesimi territori con ingenti fenomeni, di tipo alluvionale e di versante.

Inoltre, la scelta di esaminare di questo evento è stata dettata dal fatto che, i fenomeni convettivi estremi, che si sono verificati durante la giornata del 21 ottobre, non sono stati correttamente rilevati e monitorati dagli strumenti osservativi impiegati. Infatti, nonostante durante i giorni interessati dall'evento oggetto dello studio, il Centro Funzionale di Arpa Piemonte abbia esteso la propria operatività a ventiquattro ore, intensificando l'attività di previsione e di monitoraggio, incrementando il flusso già cospicuo di dati, convergenti nei modelli previsionali, non è stato possibile identificare correttamente la formazione e lo sviluppo dei due diversi sistemi temporaleschi (*Mesoscale Convective System e V-shaped*) che giorno 21 ottobre, si sono abbattuti sui territori del Basso Alessandrino, generando ingenti effetti al suolo. La mancata previsione della formazione dei sistemi temporaleschi è possibile osservarla dall'analisi dei Bollettini di Vigilanza emessi per giorno 21 ottobre (Figura 0.1). Infatti, nei territori interessanti dai fenomeni, i modelli previsionali utilizzati hanno prodotto come output una previsione di un quantitativo di pioggia giornaliera di entità "moderata", ma come è stato sottolineato nei paragrafi precedenti giorno 21 ottobre si sono registrati 432 mm in 12 ore, valore record mai registrato dalla rete pluviometrica piemontese. Dunque, la previsione e i modelli impiegati sono stati inadeguati per identificare e valutare l'evoluzione degli eventi convettivi verificatisi, estremamente localizzati e fortemente influenzati nel loro sviluppo dalle caratteristiche orografiche dell'area dove si è innescato, ed è successivamente maturato e dissipato.



Figura 0.1 - Bollettino di Vigilanza e legenda per giorno 21 ottobre, rispettivamente emanato nei giorni: 19/10/19, 20/10/19, 21/10/19.

Dalla erronea previsione, prodotta dai modelli impiegati, ne è conseguita una valutazione fuorviante dei probabili scenari di rischio, con i connessi effetti al suolo, come è possibile notare dai Bollettini di Allerta emanati (Figura IV.2). Per la giornata considerata, l'ARPA Piemonte, il 20 e il 21 ottobre, ha emesso un Bollettino di Allerta in cui per l'area in esame, per i settori G e H del Basso Piemonte, comprendenti i bacini di Belbo, Bormida e Scrivia un'allerta gialla, dunque uno scenario di rischio di ordinaria criticità per quanto riguarda l'ambito idrogeologico per temporali, che è stato successivamente comunicato alle Autorità competenti per le allerte e per la gestione delle emergenze in attuazione dei Piani di emergenza, i cui effetti e danni connessi risultano meno ingenti, rispetto a quelli poi effettivamente si sono verificati.



Figura IV.2 - Bollettino di Allerta e legenda per giorno 21 ottobre, rispettivamente emanato nei giorni 20/10/19, 21/10/19.



L'evento alluvionale, preso in considerazione, permette dunque di comprendere che, ancora oggi, esistono dei limiti e delle criticità per quanto riguarda la previsione meteorologica di questi eventi temporaleschi, estremi e localizzati, come quelli avvenuti nella giornata del 21 ottobre. Infatti, per tale tipologia di fenomeni, di natura convettiva, il cui innesco e il successivo repentino sviluppo, è influenzato da numerosi fattori, tra cui l'orografia complessa della zona in cui nascono, è di fondamentale importanza:

- Un continuo monitoraggio, attraverso strumentazioni, mediante che le loro caratteristiche prestazionali, permettono un'accurata identificazione dei fenomeni precipitativi in atto, e di valutarne l'evoluzione anche nel breve termine;
- L'applicazione di metodologie, che permettono l'integrazione delle misurazioni radar/satellitari e la rete pluviometrica a terra, per far fronte al verificarsi di queste fenomenologie incrementando l'accuratezza delle attività di previsione, relative alla gestione del rischio idrogeologico, dettato da eventi di pioggia estremi.

Analisi del Quadro Meteorologico

L'evento dell'ottobre 2019 è stato valutato effettuando un'analisi del quadro meteorologico che si è verificato nei giorni presi in esame. Tale analisi, è stata effettuata facendo riferimento ai Rapporti di evento, redatti dal Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali di ARPA Piemonte, che hanno permesso di delineare un quadro dell'evento, evidenziandone: fenomeni innescenti, intensità, distribuzione territoriale dei fenomeni e gli effetti al suolo da esso provocati.

Per comprendere la dinamica dell'evento è possibile in maniera semplificativa scinderlo in due differenti fasi:

- La prima fase (19-21 ottobre), dominata da precipitazioni a carattere convettivo dettate dalla perturbazione atlantica posta nei pressi della Penisola Iberica, che hanno colpito maggiormente la zona orientale della regione Piemonte;
- La seconda fase (22-24 ottobre), dominata da precipitazioni generate dallo scontro di masse d'aria umide e l'orografia del territorio, che hanno colpito maggiormente la zona occidentale della regione Piemonte.

La prima fase: 19-21 ottobre

L'inizio dell'evento, è possibile identificarlo in giorno 19 ottobre, in cui si iniziano a delineare condizioni di marcato maltempo, dettate dalla presenza di un'area a bassa pressione in corrispondenza della Gran Bretagna, che ha favorito lo spostamento da Sud-Ovest di masse di aria umida di scirocco, attraverso il Mediterraneo centro-occidentale in direzione del Nord-Ovest



del territorio italiano. Tale nucleo, incuneandosi in direzione dei territori della Spagna, si è scontrato con un'area di alta pressione presente sul resto della penisola italiana. Il contrasto di aree ad alta e bassa pressione ha generato, durante giorno 19, precipitazioni avvelte intense in corrispondenza delle province settentrionali del Piemonte, mentre nella parte sudorientale della regione, nella zona di confine tra Liguria e Piemonte, si è osservata la formazione di celle convettive (in cui il sollevamento orografico è stato un fattore determinante) e il verificarsi di precipitazioni a carattere di rovescio temporalesco, con picchi di pioggia con valore anomalo per la stagione in cui si sono verificati.

La zona di bassa pressione, originariamente posizionata in corrispondenza delle isole britanniche, si è, successivamente, gradualmente estesa nei giorni seguenti (20 e 21 ottobre) sulla Penisola Iberica fino a quasi raggiungere il Marocco, staccandosi progressivamente dalla regione di perturbazione principale, ancora presente alle alte latitudini, ma continuando tuttavia a convogliare aria molto calda e umida di scirocco sul Piemonte, la Liguria e la Lombardia. Il graduale approfondimento del vortice a bassa pressione verso il Mediterraneo è stato, però, fermato dalla zona di alta pressione, presente sul resto di Italia. L'area di confine, tra le due differenti e opposte aree di pressione, ha coinciso con i territori tra Piemonte, Liguria e Lombardia occidentale, Figura IV.3.

Nella mattina di giorno 20 ottobre si sono registrate precipitazioni diffuse e intense nei territori del Piemonte settentrionale e nell'Astigiano, che nel pomeriggio si sono estese all'intero territorio regionale del Piemonte e della Liguria, intensificandosi con fenomeni temporaleschi molto forti nei territori più a Nord e nel Basso Alessandrino. A testimonianza dell'eccezionalità dell'evento considerato, si riportano alcuni valori massimi registrati durante la giornata del 20 ottobre, dal sistema di monitoraggio gestito da Arpa Piemonte, tra cui: 280 mm su 24 ore a Settepani (SV), 217 mm a Montenotte Inferiore (SV), 88 mm di cui 73,6 mm in 6 ore a Serole Bric Pischera (AT), 84,2 mm in 24 ore a Ponzzone Cimaferle (AL).

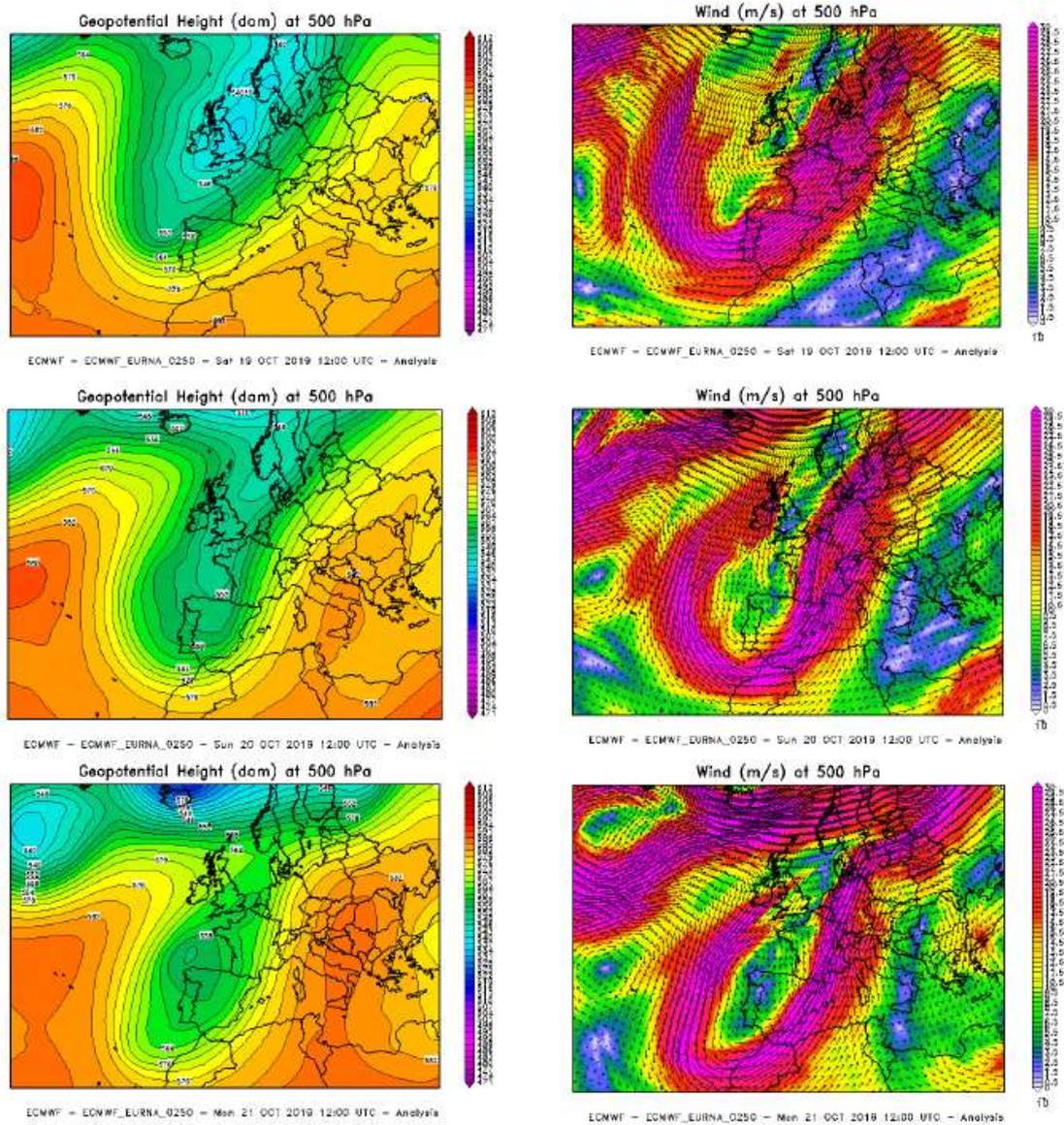


Figura 0.3 - Situazione sinottica del 19/10/19, 20/10/2019 e 21/10/19 alle 12 UTC: campo di altezza del geopotenziale a 500 hPa (a sinistra), venti in quota a 500 hPa (a destra).

Come detto in precedenza, nei giorni della prima fase è stato osservato un avanzamento dell'area a bassa pressione, interrotto dall'alta pressione che interessava il resto del territorio italiano, generando una zona di confine che ha coinvolto: Piemonte, Liguria e Lombardia occidentale. Giorno 21 ottobre, nella zona di scontro tra le regioni a bassa (dalla Penisola Iberica) e alta pressione (proveniente dalla regione mediterranea) posta al confine tra Piemonte e Liguria si sono venute a formare due diverse strutture di natura convettiva, contemporaneamente la circolazione delle masse calde e umide ha continuato a permanere in corrispondenza delle aree settentrionali ed occidentali dell'arco alpino del Piemonte.



Nelle prime ore del giorno si è formato il primo nucleo convettivo, un sistema MCS (*Mesoscale Convective System*), posto in mare al largo di Marsiglia, e che si è spostato nelle sei ore successive, attraversando i territori di Savona, Asti, Alessandria, Lombardia, fino a decadere nei pressi dell'arco alpino centro-orientale, (Figura 0.2).

L'imponente struttura temporalesca organizzata, nonostante il rapido spostamento, ha fatto registrare, nei territori interessati dal suo passaggio, precipitazioni temporalesche molto intense, accompagnate da un'intensa attività elettrica e forti raffiche di vento. Si sono, infatti, registrate nelle prime tre ore: 72 mm a Basaluzzo (AL), i 65 mm a Castellar Ponzano, i 56 mm a Ovada (AL).

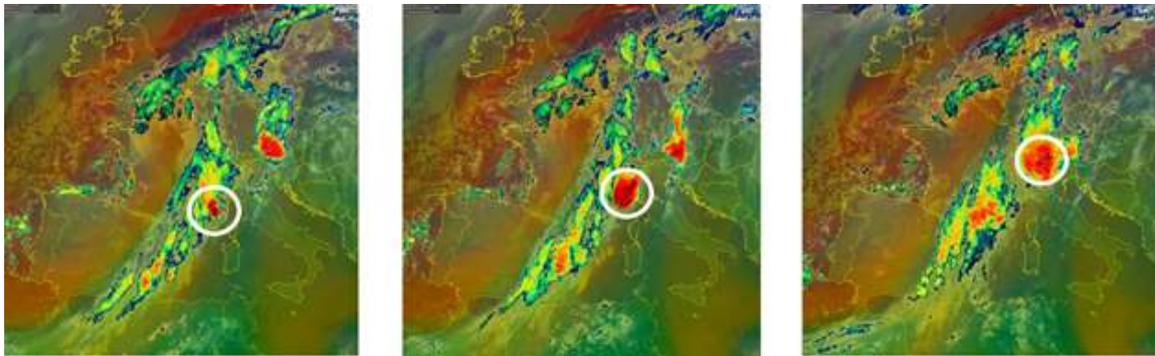


Figura 0.4 - Formazione e spostamento verso est del MCS osservato nella mattinata di lunedì 21 ottobre 2019 alle ore 00:00 UTC, 3:00 UTC e 6:00 UTC vista attraverso le immagini da satellite Meteosat composta dei canali infrarosso e vapore acqueo (EUMETSAT).

Lungo il corso della giornata, dopo il primo fenomeno convettivo, dissipato nelle prime ore della mattina, si sono verificate precipitazioni avvetive intense, a nord del Piemonte, mentre nella zona centro-orientale della regione, le precipitazioni sono diventate sempre più sparse e discontinue, a causa di un debole aumento delle pressioni.

Nelle ore centrali della giornata, il continuo spostamento del nucleo a bassa pressione ha generato un nuovo scontro con il blocco di alta pressione, che ha creato in corrispondenza del Golfo di Genova, un'area di convergenza di masse d'aria ad elevato contrasto termico, in particolare tra: i venti caldi e umidi, in ingresso verso la costa, e quelli più freschi e asciutti, provenienti dalle valli padane, in uscita verso il mare. Questa configurazione, posta a largo di Genova, ha determinato la generazione di una struttura temporalesca di tipo *V-shaped* (Figura 0.5), che si è repentinamente spostata verso Nord-Est, nell'entroterra Alessandrino, sotto l'azione costante delle correnti calde e umide, di natura sciroccale (*warm conveyor belt*). Una volta raggiunti i territori sudorientali della Provincia di Alessandria, il sistema convettivo è rimasto stazionario per più di dodici ore, bloccato dall'alta pressione presente sull'Italia centro-orientale, incrementando il proprio



potenziale distruttivo, influenzato dall'orografia del territorio (rilievi appenninici) e dal richiamo di aria umida e fresca dalla Pianura Padana. Il fenomeno convettivo ha provocando, sui territori interessati una serie persistente di scrosci temporaleschi d'intensità da record, dissipandosi solo nelle prime ore di giorno 22 ottobre, caratterizzata da precipitazioni sempre più deboli sparse e in generale esaurimento. Le immagini del radar meteorologico e del satellite (Figura IV.6), mostrano come il sistema convettivo *V-shaped* si sia evoluto: la formazione nel Golfo Ligure alle 12:00 UTC, lo spostamento verso l'entroterra ligure (Rossiglione e Gavi) e incremento in relazione all'effetto orografico dei rilievi appenninici con permanenza di circa dodici ore fino alla successiva dissipazione.

A titolo esemplificativo, per comprendere l'entità delle precipitazioni avvenute, si riportano i dati di pioggia cumulato su 12 ore registrati dalla rete di monitoraggio dell'Arpa Piemonte: la stazione di Gavi (AL) ha registrato 428 mm in 12 ore, ovvero il record per la rete di telemisura Piemontese, la stazione di Rossiglione (GE) ha superato i 400 mm in 12 ore, mentre le stazioni di Castel Ponzano (AL), Bric Castellaro (AL), Arquata Scrivia (AL), Sardigliano (AL) e Castellar Ponzano (AL) hanno raggiunto cumulate di pioggia di oltre 300 mm, con picchi orari torrenziali compresi tra i 60 mm e gli 80 mm.

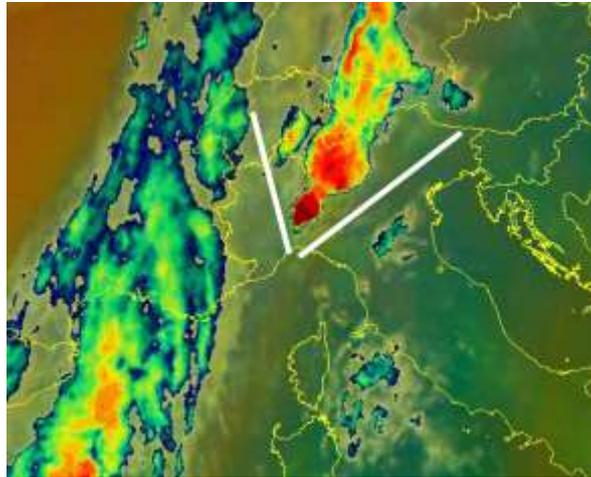


Figura 0.5 - Immagine Meteosat composta dei canali infrarosso e vapore acqueo (EUMETSAT), in cui si osserva la classica forma a V del sistema convettivo alla mesoscala presente sull'Alessandrino alle ore 15:00 UTC del 21 ottobre.

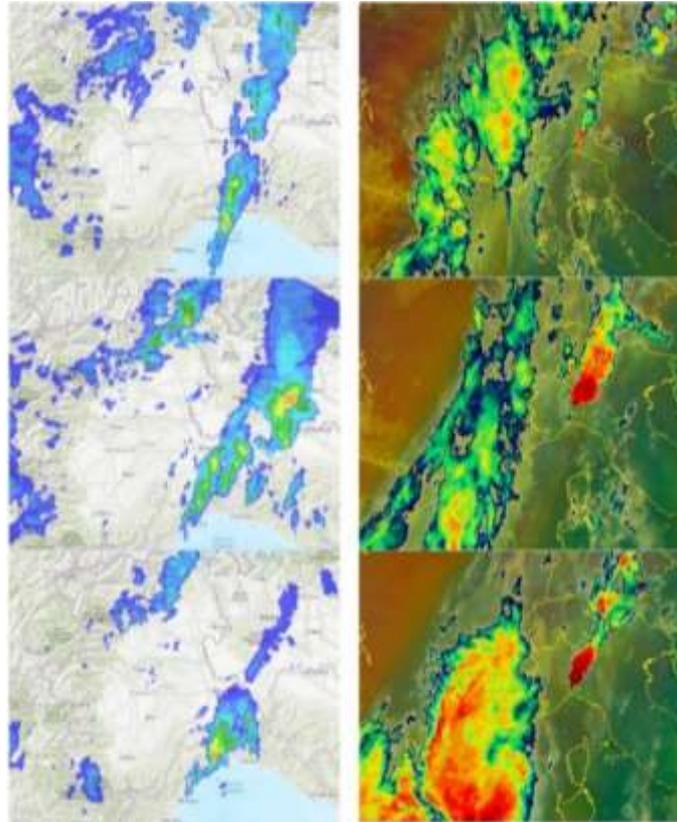


Figura IV.6 - Intensità di pioggia istantanea stimata da radar meteorologico (sinistra) e immagini da satellite Meteosat composta dei canali infrarosso e vapore acqueo (destra) alle scadenze (dall'alto in basso) del 21/10/2019 ore 12:00 UTC, 21/10/2019 ore 18:00 UTC e 22/10/2019 ore 00:00 UTC.

Seconda fase: 22-24 Ottobre

Nella seconda fase dell'evento, nella mattina del 22 ottobre, la persistenza dell'area a bassa pressione, posta in corrispondenza della Spagna, ha portato all'indirizzamento dei flussi umidi provenienti dall'Africa settentrionale verso il Piemonte. Tale incontro, tra le masse umide e i rilievi dell'arco alpino, ha portato ad un fenomeno di sollevamento forzato e di precipitazioni molto intense sul settore pedemontano occidentale. L'elevata umidità, unita al sollevamento orografico, ha portato così al verificarsi di precipitazioni moderate con picchi localmente forti su tutta la parte montana e pedemontana settentrionale e nordoccidentale. Tali fenomeni si sono esauriti nel pomeriggio, in modo temporaneo, a causa di lieve rimonta dell'alta pressione.

Giorno 23 ottobre, la perturbazione proveniente dalla Spagna si è avvicinata ad Est, verso il Mar Ligure, posizionandosi in serata tra i Pirenei e le Isole Baleari. Il movimento delle aree a bassa pressione ha comportato lo spostamento di masse e dunque venti intensi, caldi e umidi, dal mediterraneo meridionale, innescando nel Mar Tirreno uno scontro tra masse d'aria con temperature diverse (aria più calda e umida che affluisce da sud, aria più fresca che arriva dai quadranti occidentali). Le precipitazioni nel territorio piemontese, dettate dalla struttura ciclonica,



sono state deboli nel primo pomeriggio, intensificandosi durante il corso della giornata, e interessando maggiormente le zone sudoccidentali con valori localmente molto forti, anche a carattere temporalesco, andando ad estendersi poi a tutta la regione, dapprima in modo sparso, poi in serata in maniera diffusa. Dalla tarda serata del 23 ottobre, le precipitazioni sono aumentate di intensità. Nel corso della notte e al primo mattino, però, l'intera struttura perturbata è tralata velocemente verso est, andando a interessare così le zone orientali di Piemonte e Liguria e la Lombardia, con piogge più deboli e sparse su tutto il settore occidentale. Successivamente, la struttura è tralata fino ad allungarsi e unirsi, nel corso della notte, con la saccatura atlantica posizionata più a nord, spostandosi ulteriormente verso est, mantenendo un flusso umido e perturbato. L'intera struttura tenderà a indebolirsi nel corso della giornata seguente. In seguito, nella notte del 24, l'area di bassa pressione si è riunita con il nucleo madre e traslando ulteriormente verso est.

Giorno 24 ottobre, una zona di depressione nel Golfo Ligure ha convogliato masse d'aria dai territori ad Est, riattivando le precipitazioni anche sul settore occidentale (zone montane e pedemontane nordoccidentali), mentre l'intenso flusso umido continuava ad alimentare le piogge sulle zone orientali al confine con Lombardia e Liguria, con valori forti o molto forti, anche a carattere temporalesco. Nel pomeriggio dello stesso giorno la condizione meteorologica si è mantenuta costante determinando ancora precipitazioni nelle zone montane e pedemontane. In serata infine l'indebolimento della struttura e il suo allontanamento ha favorito un generale miglioramento del tempo ed un esaurimento dei fenomeni.

I Principali Effetti al Suolo

In questo paragrafo si riportano i principali effetti al suolo, che si sono concentrati nella zona tra Ovada e Gavi, i territori dove le piogge sono state più intense e i danni maggiormente ingenti.

Gli effetti, riconducibili da un lato all'intensità e persistenza dei fenomeni, dall'altro alle condizioni di saturazione del terreno iniziali, si possono suddividere in due diverse categorie:

1. I *dissesti idraulici* sono legati maggiormente al reticolo idrografico minore. L'area è stata pesantemente coinvolta da una crisi generalizzata dei rii minori, i quali sono esondati in più punti con fenomeni di alluvionamento importanti, e talvolta danni alle infrastrutture, (Figura 0.7 -8).



Figura 0.7 - Capriata d'Orba (AL): ponte della SS155 abbattuto la sera del 21 ottobre 2019 dalla piena del T. Albedosa, tributario destro dell'Orba (da La Repubblica).



Figura 0.8- Danni alluvionali a causa del reticolo secondario, in ordine da sinistra: 1) Raggiungimento del livello del piano campagna del livello dell'acqua esondata 2) Esondazione nei pressi del guado sul Torrente Lemme 3) Allagamento del campo sportivo sito nel comune di Gavi.

- I dissesti di versante superficiali, decisamente densi e di natura molto differente, sono stati scatenati dalle precipitazioni brevi ed intense che hanno interagito con la litologia dell'area coinvolta, caratterizzata da depositi superficiali abbondanti e a granulometria mediamente fine. I fenomeni principali, che con il loro impatto diretto con il materiale mobilizzato hanno generato il maggior numero di danni, al centro abitato di Gavi e le infrastrutture viarie, sono sicuramente i colamenti e gli scivolamenti rapidi, causati dalla saturazione e fluidificazione, che hanno interessato la porzione più superficiale della coltre, (Figura 0.9).

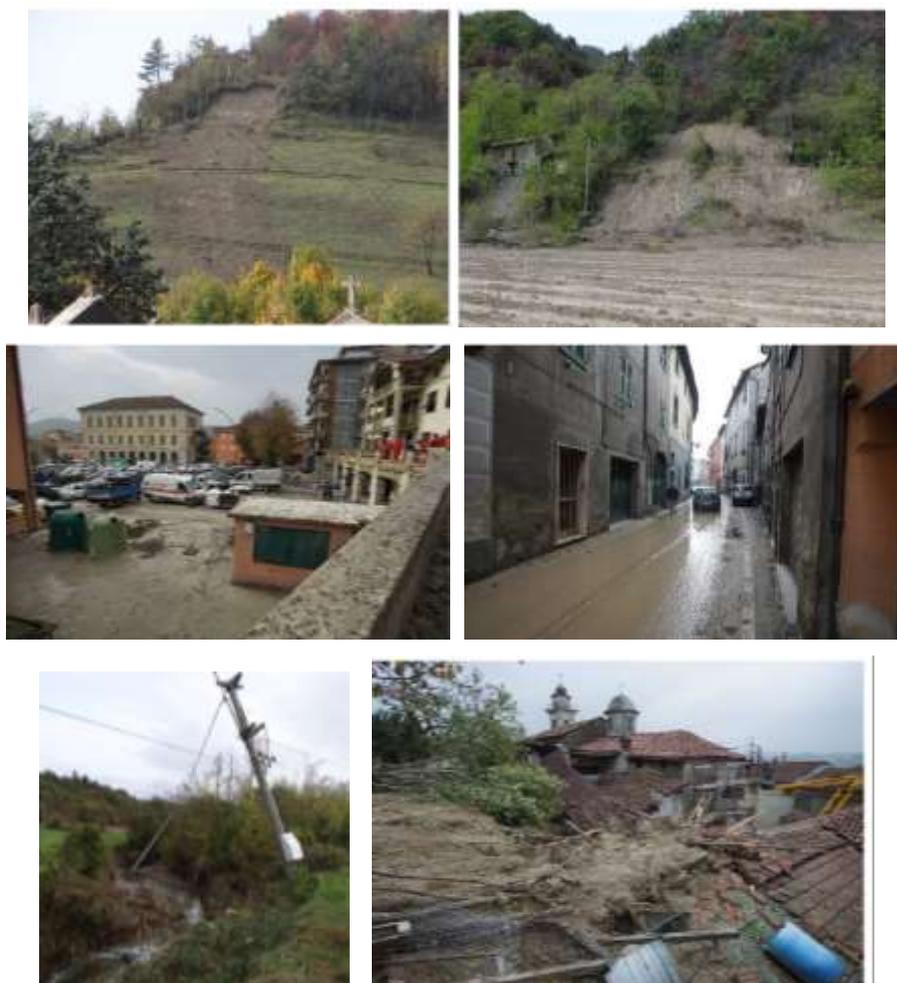


Figura 0.9 - Dissesti di versante provocati dalle intense e persistenti piogge nel territorio di Gavi, in ordine da sinistra: 1) Fluidificazione di coltre superficiale 2) Rimobilizzazione di terreni di copertura 3) e 4) Centro urbano di Gavi alluvionato da fango e detriti 5) Danni per erosione di sponda ed esondazione ad opera del Torrente Nerone 6) Danni al tetto dell'Oratorio dei Turchini.



Metodo ATS (2015): Evento Alluvionale del Basso Alessandrino 19-24/10/2019

Applicazione Metodo ATS (2015)

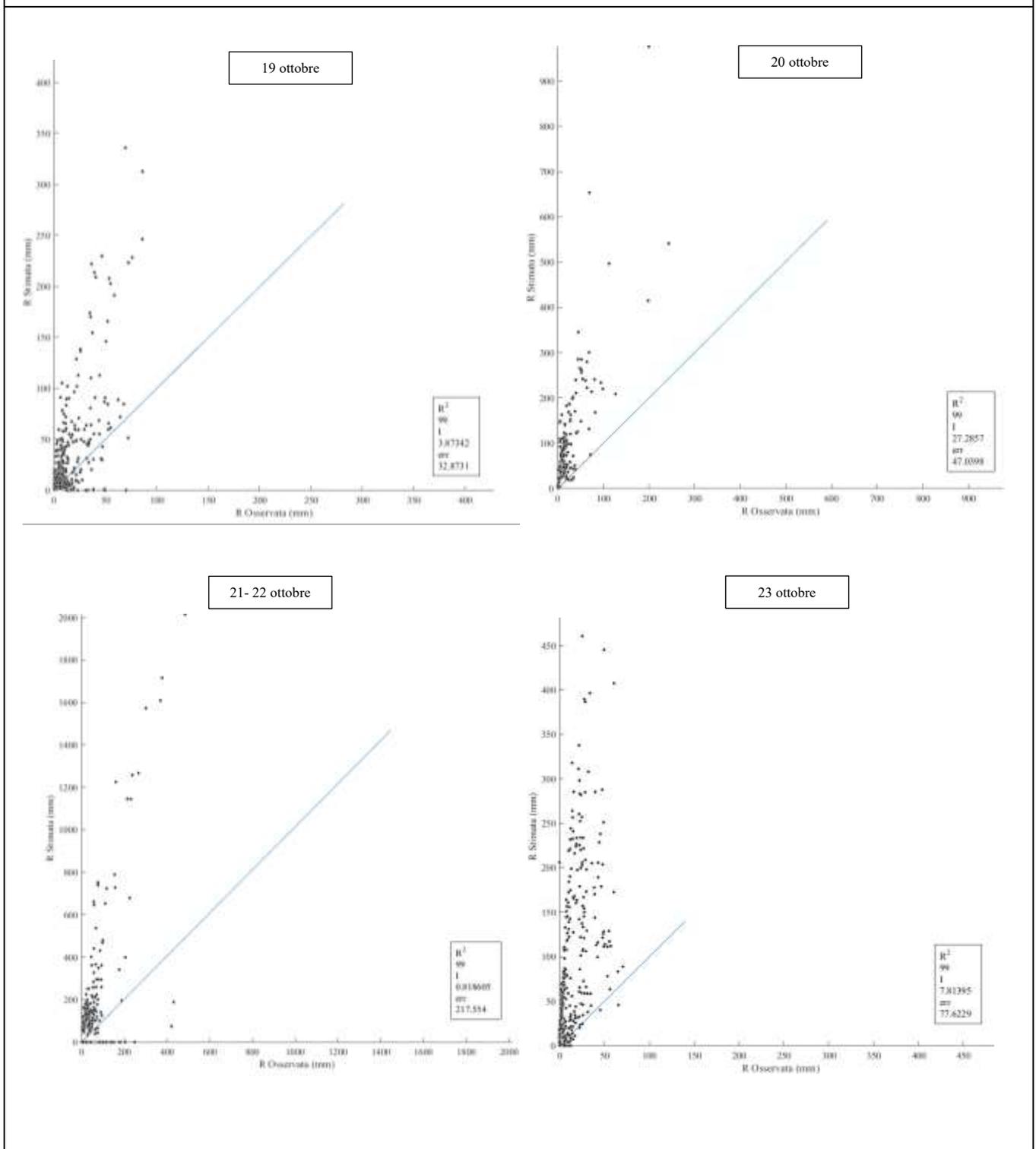
In questo lavoro di tesi si è proceduto con l'implementazione della tecnica adattativa nel tempo e nello spazio, ATS (2015), descritta nei capitoli precedenti, per effettuare un'analisi ex post degli eventi alluvionali che hanno colpito i territori del Basso Alessandrino, nei giorni compresi tra il 19 e il 24 ottobre 2019. In questo modo, si vuole valutare l'effettiva capacità di stima della precipitazione di questa metodologia adattativa, il cui funzionamento è basato sull'integrazione di un flusso cospicuo di dati, derivanti dalla rete radar nazionale e dalla rete pluviometrica posta al suolo.

La scelta dell'adozione di tale approccio "adattativo" è stata dettata dalla consapevolezza che, le tecniche estimative a parametri fissi non producono risultati che permettono di identificare la reale variabilità spaziale e temporale dei fenomeni precipitativi, e stime di altezza di pioggia il cui errore risulta "accettabile". L'applicazione di approccio a stima fissa, in particolare mediante l'adozione dei parametri caratteristici proposti in Marshall&Palmer (1948), sui dati relativi al caso studio preso in considerazione, provoca una forte sovrastima dei valori di pioggia effettivamente osservati, impedendo la produzione di risultati compatibili con qualsiasi applicazione operativa. Dall'analisi dei risultati prodotti (Tabella V.1), emerge, quindi, che il solo dato radar, elaborato con metodologie di stima "non adattative" non permette di effettuare delle valutazioni realistiche, poiché l'errore da cui questo è affetto non viene mitigato dall'integrazione di dati derivanti da altri strumenti osservativi, e l'impiego di parametri costanti non permette di rilevare il reale sviluppo dell'evento di pioggia. .



Tabella V.1- Confronto: valori di pioggia osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche e quelli stimati stimati dall'applicazione della relazione Z-R ($a=1.6, b=200$), sui dati di riflettività Z.

Confronto: Valori di Pioggia Cumulati su 24h Osservati e Stimati con Relazione Z-R Fissa





L'implementazione della metodologia di stima "adattativa" è avvenuta mediante l'impiego dello *script* originale redatto da Libertino et al., (2015), in cui vengono inseriti come dati di input:

- I dati relativi ad ognuno dei quattrocento pluviometri, appartenenti della rete di monitoraggio di ARPA Piemonte, ricadenti sul suolo della Regione Piemonte, e in parte sulle confinanti (Liguria e Lombardia), in termini di: codice della stazione, latitudine, longitudine e altitudine, e i dati di pioggia, rilevati e cumulati su dieci minuti;
- I dati di riflettività (Z), relativi alla cella nella quale risulta ubicata ognuna delle quattrocento stazioni pluviometriche. Tali informazioni sono rilevate per l'intero territorio nazionale dalla rete radar nazionale (RRN) gestita dal Dipartimento della Protezione Civile e forniti con una cadenza di dieci minuti. I dati radar sono stati forniti sotto forma di prodotto SRI, e dunque successivamente sono stati riconvertiti in valore di riflettività applicando la formula di Marshall&Palmer (1948). Tale procedura ovviamente comporta delle criticità in quanto la conversione, mediante l'applicazione della formula inversa, non porta ad un valore corretto di riflettività.

L'adozione del metodo ATS (2015) produce come dati di output, per ogni evento considerato i seguenti prodotti di output:

- I valori orari in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica dei parametri ottimizzati a e b ;
- Il valore orario del valore Z_{soglia} , necessario per l'eliminazione della "precipitazione di fondo";
- I valori orari e cumulati su 24 ore della stima della precipitazione in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica;
- Il grafico di confronto, sotto forma di *scatter plot*, tra precipitazioni osservate e stimate, orarie e cumulate su 24 ore, in tutte le stazioni pluviometriche funzionanti;
- Il valore dei parametri descrittivi per valutare la correttezza della metodologia di stima: indice di correlazione R^2 , la pendenza della retta interpolante I , e l'errore sulla stima del volume di pioggia per ogni stazione *err*.

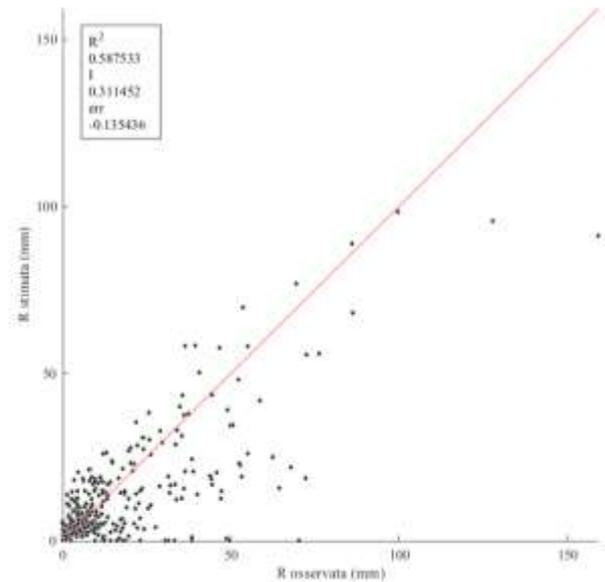
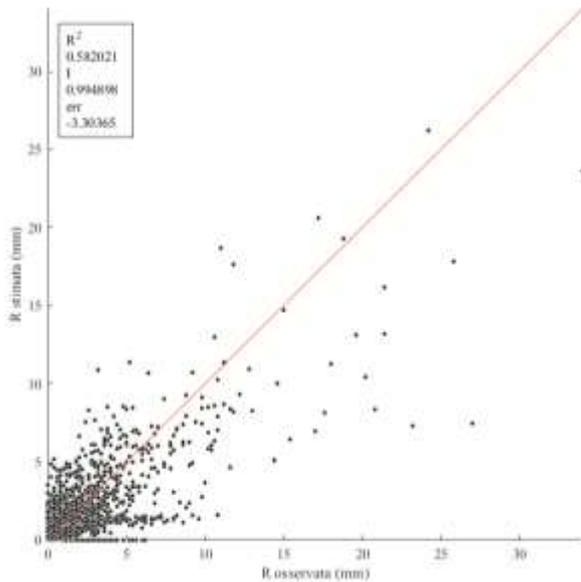
Si riportano di seguito, Tabella V.2, i prodotti di output.



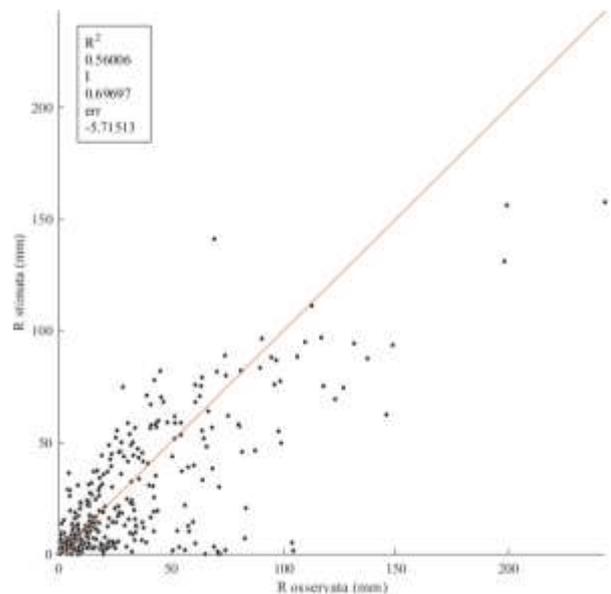
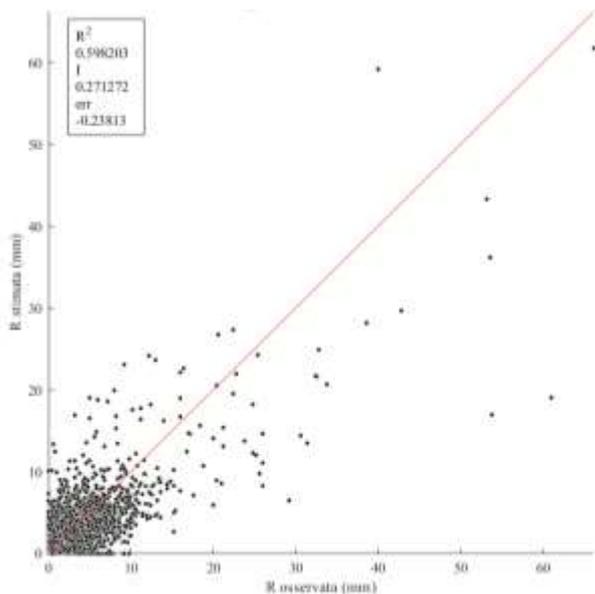
Tabella 0.2- Prodotti del metodo ATS: Grafici di confronto tra precipitazioni stimate ed osservate, orarie e su 24 ore, e relativi parametri descrittivi.

Confronto: Valori di Pioggia Cumulati su 24h Osservati e Stimati con Relazione Z-R Adattativa

19 ottobre

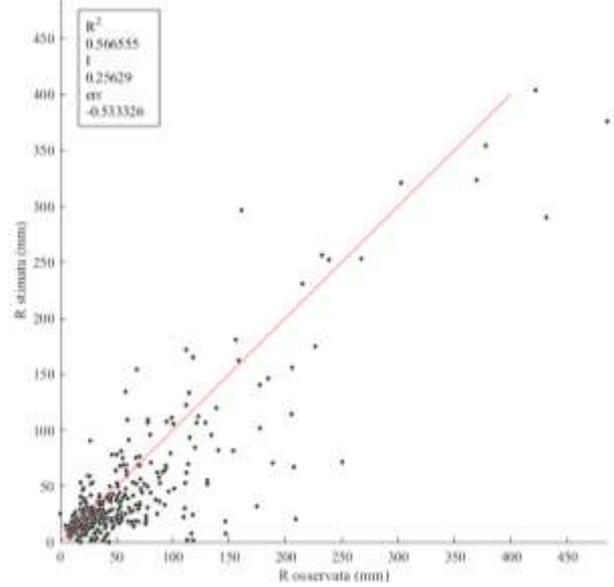
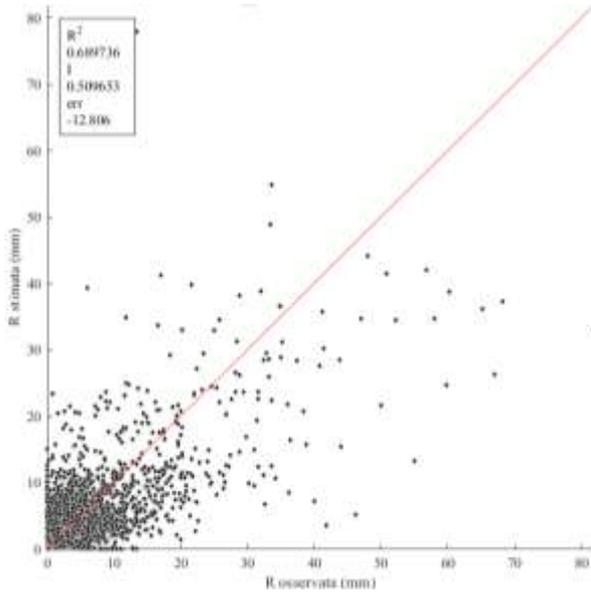


20 ottobre

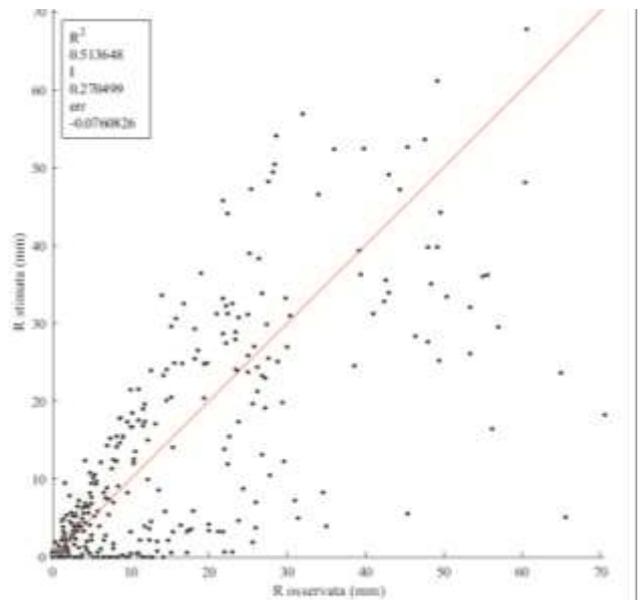
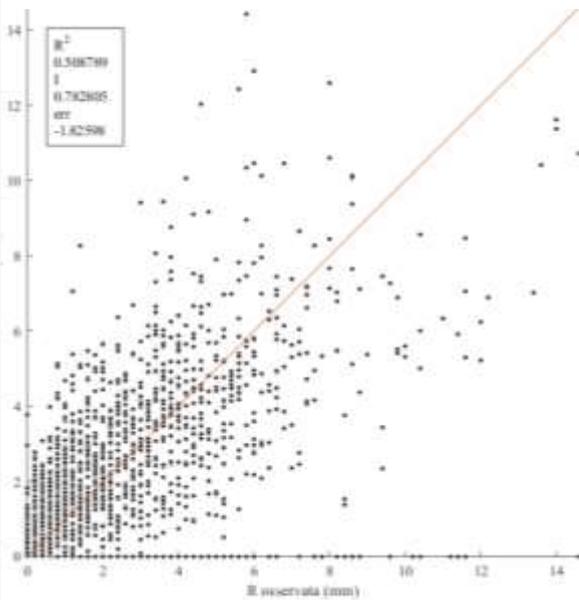




21-22 ottobre



23 ottobre





Ricostruzione del Campi di Pioggia dal Metodo ATS (2015)

Metodologia applicata

La metodologia ATS (2015), applicata in precedenza, permette la stima delle precipitazioni in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica, coniugando i vantaggi dell'utilizzo integrato di osservazioni pluviometriche e da radar meteorologico. Essendo i risultati "puntuali" ritenuti soddisfacenti, si è dunque implementata una metodologia di stima che, a partire dai parametri ottenuti mediante una calibrazione, che avviene in maniera costante nel tempo e nello spazio a partire dai dati osservati, permettesse di ottenere una stima delle precipitazioni di tipo areale.

Per la ricostruzione del campo delle precipitazioni si sono dunque adottati i parametri forniti dall'applicazione di Libertino et al., (2015):

- I parametri caratteristici a e b orari, forniti per ogni stazione pluviometrica considerata;
- Il valore orario di Z_{soglia} .

La metodologia è possibile riassumerla come segue:

1. Costruzione della matrice delle Latitudine e Longitudine

Essendo il dato di partenza una moltitudine di matrici di riflettività, ognuna relativa a un [di dieci minuti, per i cinque giorni dell'evento, si è deciso di riunire tali tipologie di dati sotto forma di matrice ad n -dimensioni, in cui i dati di riflettività sono stati riportati sottoforma oraria. L'estensione planimetrica della matrice costruita in precedenza, in termini di latitudine, longitudine e dimensione della cella è nota, e si è, dunque, proceduto con la costruzione di una matrice bidimensionale di eguali dimensioni, in cui per ogni cella viene riportato il valore delle coordinate geografiche.

2. Costruzione della matrice delle Minime Distanze

I valori dei parametri a e b , output del metodo ATS (2015) sono associati alla posizione di ogni pluviometro, dunque si è scelto di associare i medesimi valori ad ognuna delle celle che si trovano più vicine, seguendo un algoritmo di tipo *nearest neighbor*. Per ognuna delle celle dalla matrice contenente le coordinate geografiche, si è calcolato il valore della distanza da ognuno dei pluviometri disponibili, e successivamente si è associato ad ognuna delle celle il codice della stazione pluviometrica più vicina.

3. Costruzione della matrice del Parametro a e b

Dall'associazione di ogni cella della matrice bidimensionale al pluviometro più vicino, è stato quindi possibile individuare il vettore dei parametri caratteristici (a , b) orari, relativi ad ogni punto



dell'area di interesse. Si sono così ottenute due diverse matrici ad n -dimensioni dei parametri caratteristici della relazione Z-R.

4. Costruzione della matrice delle piogge stimate

Infine, è stata calcolata la matrice delle piogge stimate, a partire dalla matrice di riflettività, dei parametri a e b e dal vettore soglia, mediante l'applicazione della legge esponenziale del tipo Equazione 2.1.

Risultati e discussione

In questo paragrafo, si riportano i risultati ottenuti mediante la procedura descritta precedentemente, relativi alla ricostruzione dei campi di pioggia, cumulata su 24 ore, verificatasi durante i quattro giorni dell'evento considerato.

Per quanto riguarda la valutazione della capacità di stima dei valori di pioggia, per ognuno degli eventi, si riporta sotto forma di *scatter plot*, il confronto tra le precipitazioni giornaliere stimate dalla metodologia utilizzata e quelle osservate, in corrispondenza delle stazioni poste nell'area dove è stata registrata maggiore riflettività, (Figure V.1-4). In generale, è possibile osservare che non vi è un perfetto adattamento tra dati osservati e stimati: in tutti i casi è possibile identificare la presenza di un errore nella stima, che risulta maggiormente contenuto per precipitazioni di minore entità, e più rilevante per le precipitazioni più intense. Nonostante, la calibrazione costante nel tempo e nello spazio dei parametri caratteristici, l'impiego dei valori ottenuti permette una mitigazione dell'errore, che comunque risulta ancora presente. Tale errore, è probabilmente imputabile a fonti, che possono affliggere la stima della precipitazione, non direttamente connesse alla procedura di conversione della riflettività in precipitazione. Per spiegare la sovrastima è possibile fare riferimento alle considerazioni riportate in McGraw et al., (2019). In questo lavoro di ricerca, infatti, si valuta la distribuzione dell'errore delle misurazioni radar, nella rete di monitoraggio che ricopre il territorio degli Stati Uniti, sulla base di una dipendenza quest'ultimo in relazione alle regioni geografiche e climatiche. Da tale analisi, emerge che nelle regioni caratterizzate da una tipologia di clima mediterraneo (presente lungo la costa occidentale), in generale, si osserverà un forte errore, che porta ad una sovrastima.

Quindi, nella regione considerata per l'analisi dei dati, sullo spartiacque tra Liguria e Piemonte, è possibile ipotizzare un errore, dettato dalle caratteristiche climatiche, ma anche da quelle topografiche (*beam-blocking*). Il che, permette di supporre, che essendo i territori in analisi, particolarmente complessi, climaticamente e orograficamente, essendo ubicati in una regione di confine tra la pianura e la catena appenninica, non è possibile ottenere delle stime esatte di pioggia, dall'impiego delle misurazioni effettuata dalle stazioni radar meteorologiche.



Nonostante gli eventuali errori, di natura meteorologica o strumentale, che possono compromettere la qualità delle stime di pioggia, l'informazione derivante dallo strumento radar meteorologico risulta comunque di fondamentale importanza, in particolare, in corrispondenza di fenomeni a carattere convettivo, come quelli che hanno caratterizzato il caso studio preso in esame. Infatti, l'osservazione radar, essendo caratterizzata da continuità spaziale e temporale permette di rilevare l'evoluzione dei fenomeni di pioggia, e quindi di identificare e tenere traccia dei nuclei temporaleschi, con un'ottima accuratezza. Questa operazione, per la natura puntuale delle osservazioni, non è possibile effettuarla mediante la sola rete di monitoraggio al suolo. Infatti, nonostante, la rete pluviometrica piemontese sia distribuita in maniera abbastanza omogenea sul territorio regionale, è possibile rilevare eventi di precipitazioni estreme con caratteristiche meteorologiche frontali di lunga durata, ma difficilmente le precipitazioni di tipo convettivo, che coinvolgono generalmente estensioni di poche decine di chilometri. Le informazioni pluviometriche, non tenendo conto dell'elevata variabilità il rapido sviluppo di questi fenomeni atmosferici, non generano un'informazione adeguata dei campi di pioggia: la possibilità di eventi di pioggia che possono "sfuggire" all'osservazione è tutt'altro che trascurabile. Infatti, sovrapponendo le mappe di pioggia identificate e l'ubicazione delle stazioni ricadenti nell'area di interesse, è possibile notare come per tutti gli episodi temporaleschi, la posizione dei picchi di precipitazione è posta in corrispondenza di territori in cui non sono presenti stazioni di misura.

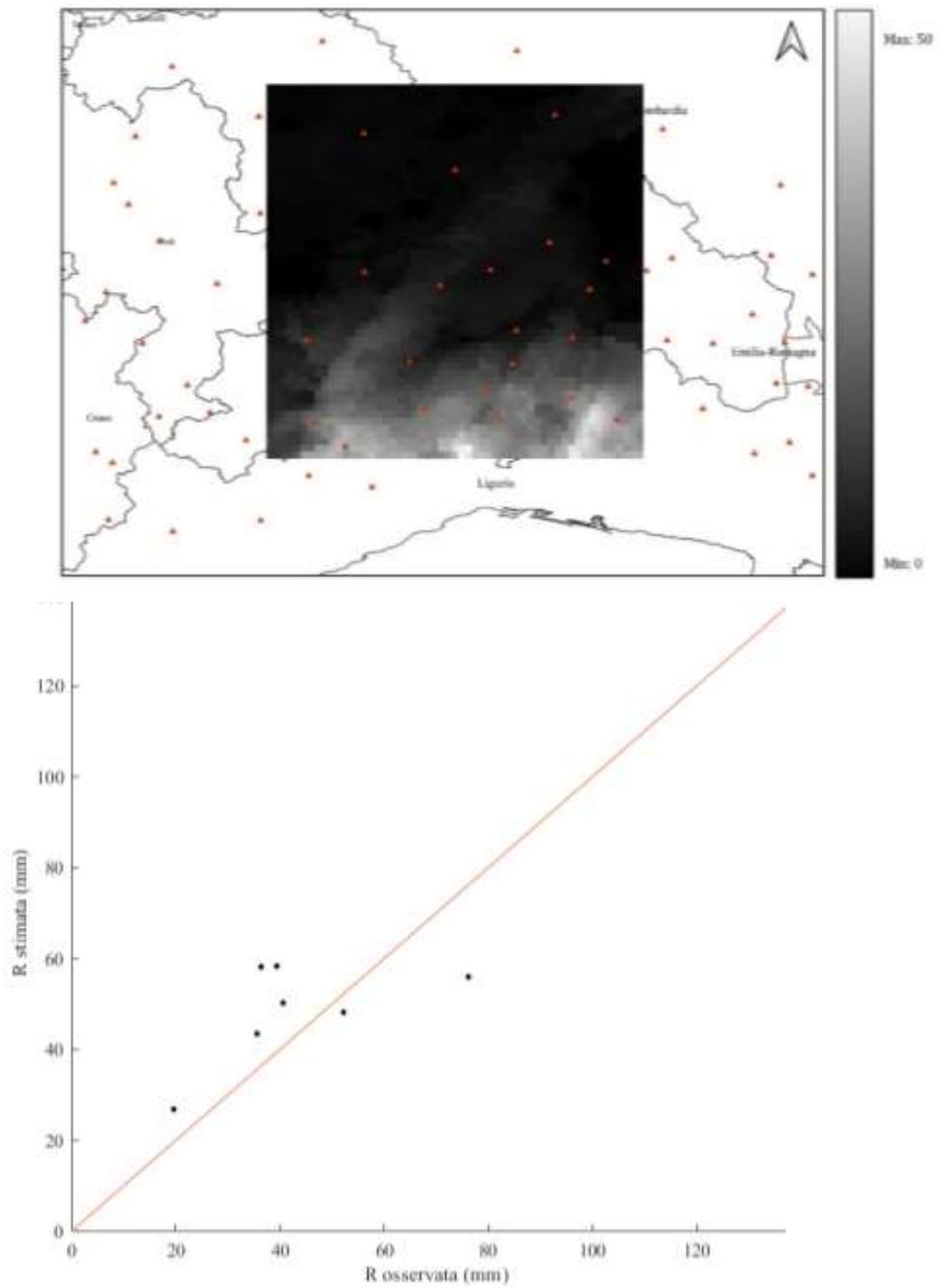


Figura 0.1- 19/10/2019 Mappa della precipitazione stimata, cumulata su 24h, mediante l'applicazione dei parametri forniti da Libertino, sovrapposta con la rete pluviometrica, e dettaglio dello scatter plot di confronto tra le piogge stimate e quelle osservate in corrispondenza della zona di massima riflettività.

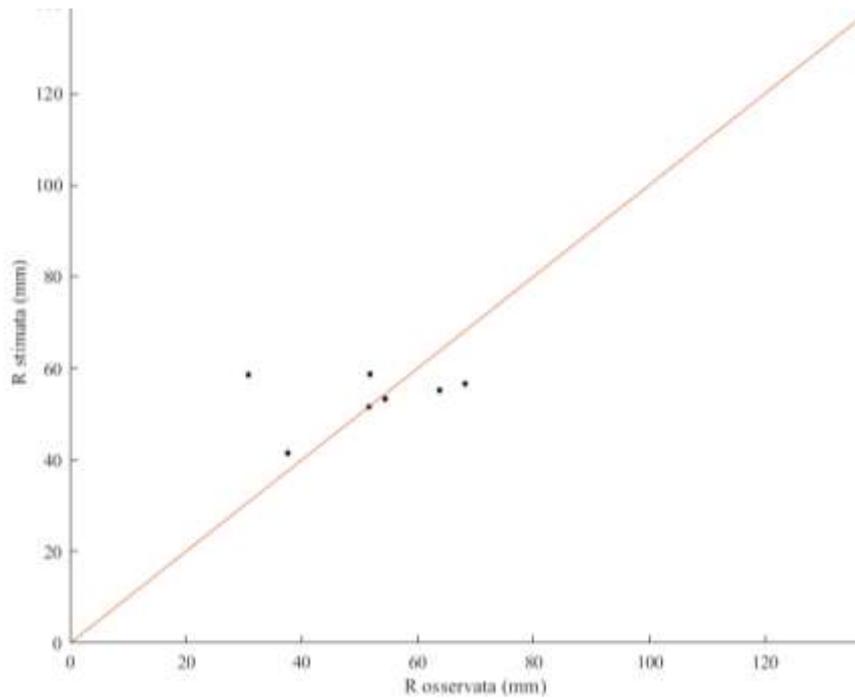
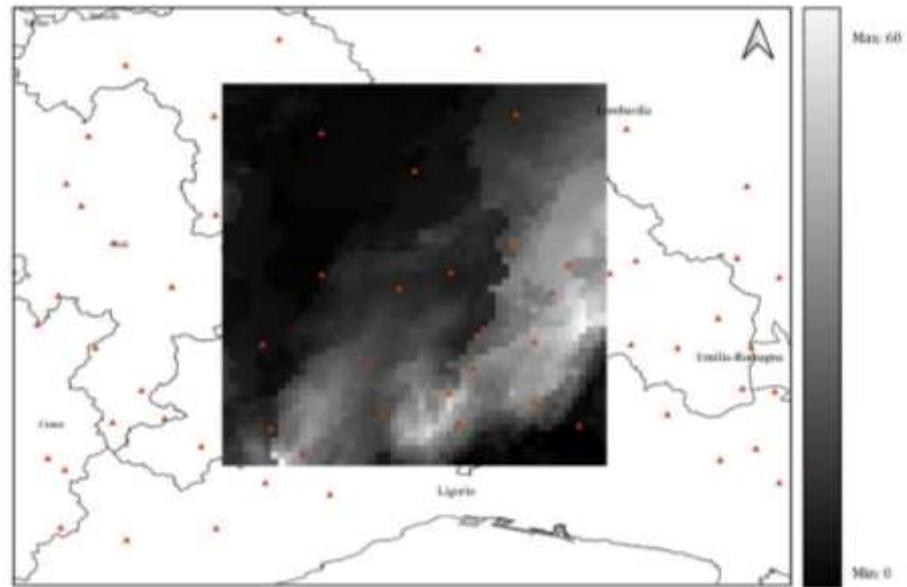


Figura 0.2 – 20/10/2019 Mappa della precipitazione stimata, cumulata su 24h, mediante l'applicazione dei parametri forniti da Libertino, sovrapposta con la rete pluviometrica, e dettaglio dello scatter plot di confronto tra le piogge stimate e quelle osservate in corrispondenza della zona di massima riflettività.

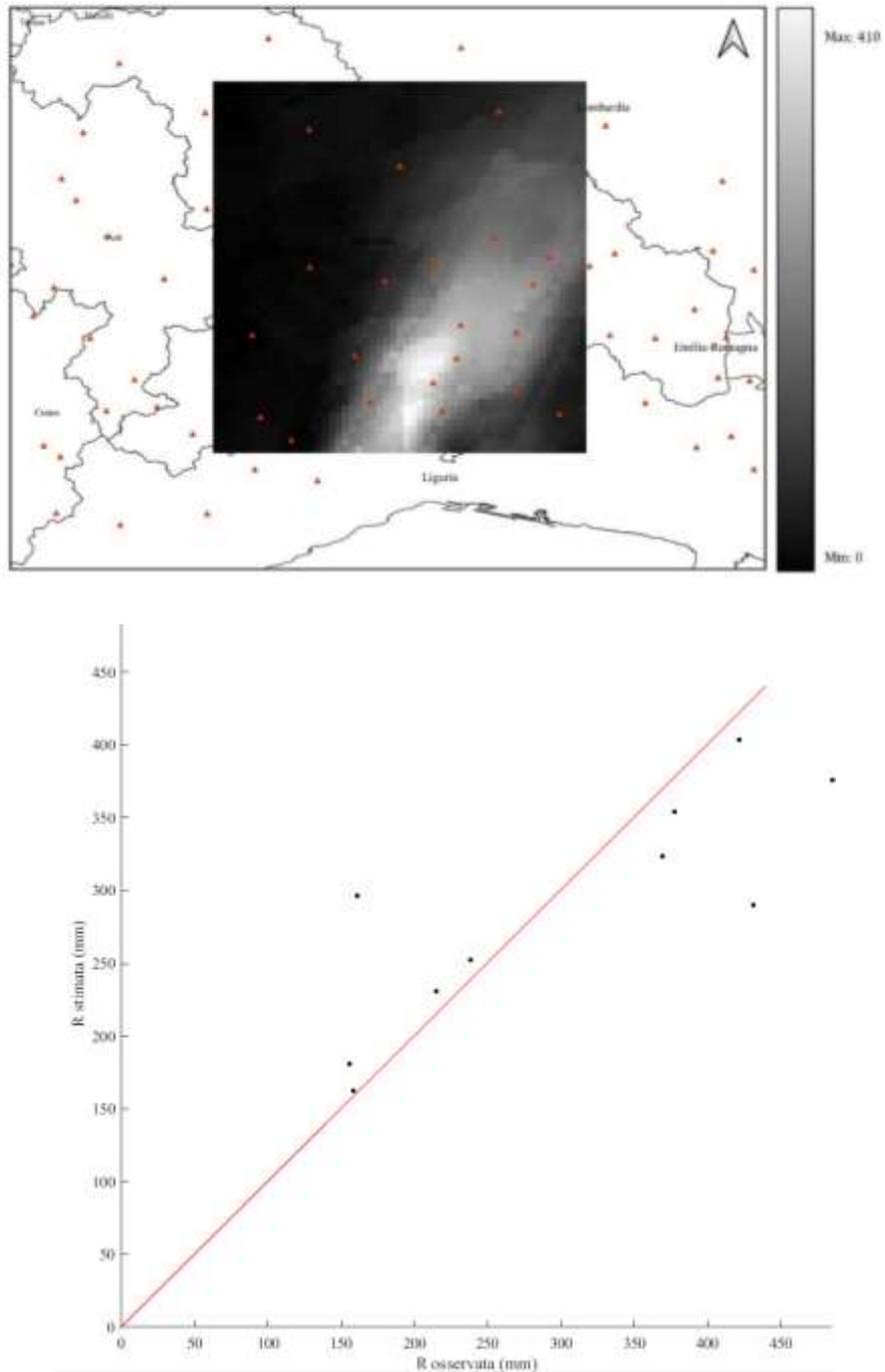


Figura 0.3 – 21-22/10/2019 Mappa della precipitazione stimata, cumulata su 24h, mediante l'applicazione dei parametri forniti da Libertino, sovrapposta con la rete pluviometrica, e dettaglio dello scatter plot di confronto tra le piogge stimate e quelle osservate in corrispondenza della zona di massima riflettività.

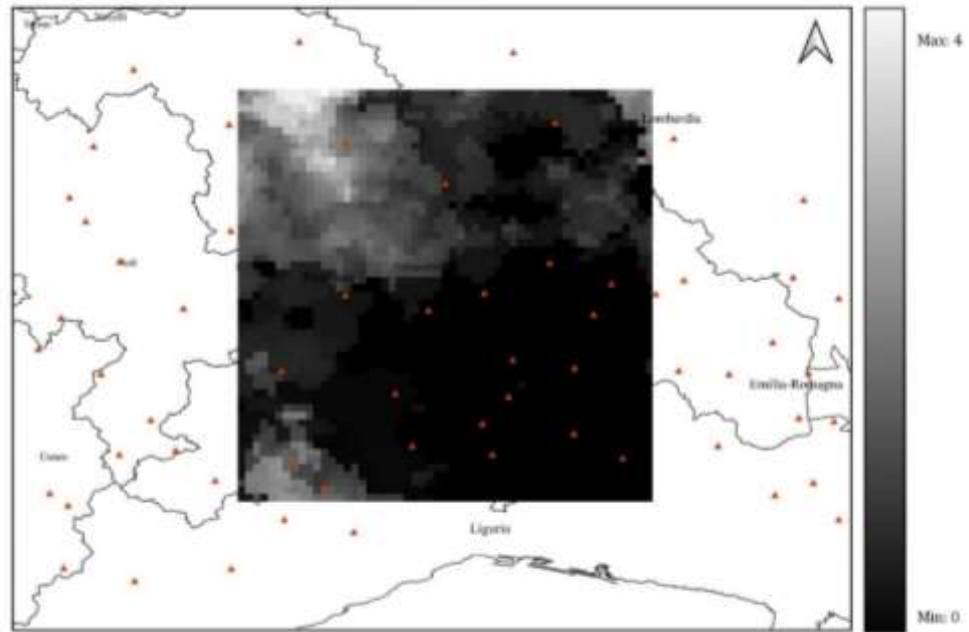


Figura 0.4 – 23/10/2019 Mappa della precipitazione stimata, cumulata su 24h, mediante l'applicazione dei parametri forniti da Libertino, sovrapposta con la rete pluviometrica, e dettaglio dello scatter plot di confronto tra le piogge stimate e quelle osservate in corrispondenza della zona di massima riflettività.



Introduzione del Dato delle Fulminazioni

Introduzione

Nel capitolo precedente, è stata effettuata una ricostruzione degli eventi di pioggia, che si sono verificati in corrispondenza dei territori del Basso Alessandrino, tra il 19 e il 24 ottobre 2019. L'elaborazione delle mappe di pioggia è stata condotta mediante l'applicazione di una metodologia di tipo "adattativo", in particolare la tecnica ATS (2015), basata sull'integrazione delle informazioni fornite dal radar meteorologico e la rete delle stazioni pluviometriche.

In questo capitolo, invece, si intende procedere con un'analisi del medesimo evento prendendo, però, in considerazione il dato relativo alle fulminazioni, che sono state registrate, giorno per giorno, in corrispondenza dei territori d'interesse coinvolti dai fenomeni alluvionali. L'analisi post evento, basata sul confronto del dato delle scariche elettriche con le informazioni relative alle precipitazioni, e la riflettività, è stata effettuata con lo scopo di:

- Comprendere se il dato delle fulminazioni risulta effettivamente connesso a quello delle precipitazioni di natura convettiva, e per eventualmente validare le correlazioni spaziali e temporali, documentate in letteratura scientifica, in corrispondenza del territorio della Regione Piemonte;
- Identificare una metodologia di stima dei volumi di pioggia a partire dal dato delle scariche elettriche registrate, che permetta la ricostruzione della distribuzione spaziale delle precipitazioni.

In caso di ottenimento di risultati positivi, è possibile supporre che le reti di rilevamento delle fulminazioni, mediante un monitoraggio, preciso, in tempo reale e "a lungo raggio", delle scariche elettriche, possano essere uno strumento utile da impiegare in maniera congiunta alle tecnologie attualmente in uso, come osservazioni pluviometriche, radar o di tipo satellitare. In particolare, possibili applicazioni delle informazioni sulle scariche elettriche sono: il monitoraggio di forti attività temporalesche in maniera continua su grandi scale spaziali, e la validazione e l'incremento dell'accuratezza delle previsioni dei fenomeni convettivi e delle precipitazioni ad essi connessi (da un punto di vista qualitativo, per anticiparne l'innesco, l'ubicazione e la traiettoria, e da un punto di vista quantitativo, per una stima più precisa dei volumi di pioggia, in termini di intensità), nel brevissimo termine.



Infatti, nonostante si riconoscano la rilevanza e le potenzialità dell'informazione radar, queste possono essere soggette a numerose fonti di errore, che possono comportare l'erronea misurazione dei valori di riflettività, dettate dalle caratteristiche climatiche e orografiche dei territori soggetti a copertura, e talvolta ad una limitazione o assenza di copertura sui territori circostanti la stazione, Figura 0.1. Svvariati studi hanno valutato l'inserimento e l'integrazione del dato relativo alle scariche elettriche all'interno dei processi di previsione, tra cui Federico et. al., (2018), il quale afferma che l'integrazione del dato dei fulmini con la riflettività osservata dal radar meteorologico abbia un impatto significativo e positivo sulle previsioni delle precipitazioni, nel brevissimo termine (VSF- *very short-term forecast*), rispetto all'impiego del solo dato del radar meteorologico. Infatti, i risultati dello studio, sottolineano quanto la fusione dei dati sia importante da un punto di vista pratico ai fini della protezione civile, poiché tramite questa integrazione si riesce a modificare un mancata previsione di precipitazioni intense, in una corretta.

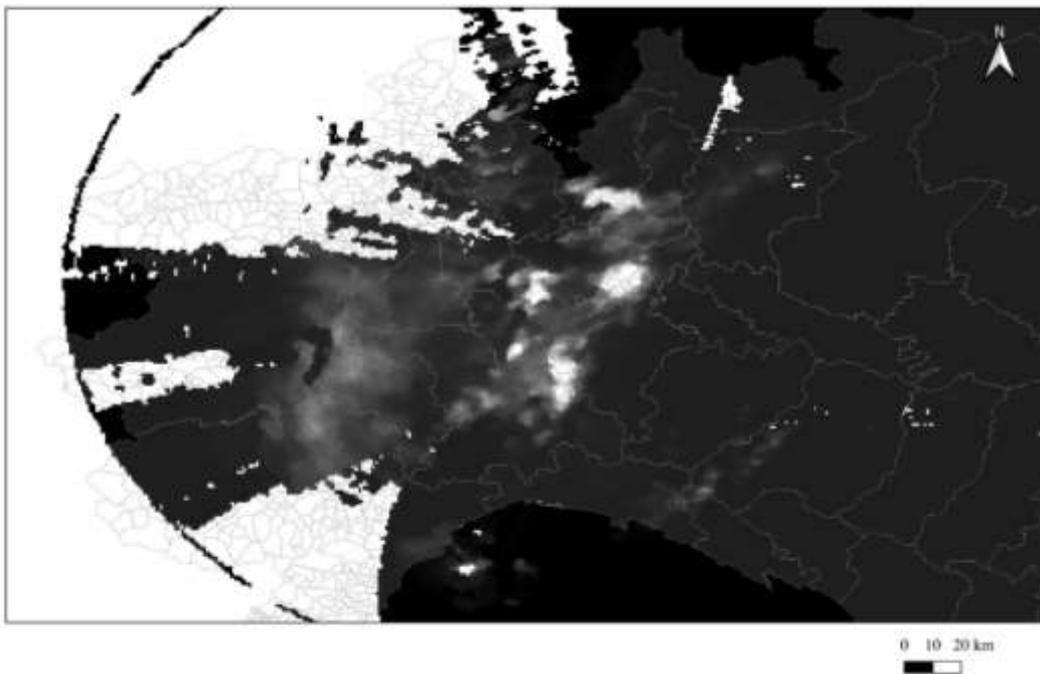


Figura 0.1 - Esempio di malfunzionamento della rete di radar meteorologici durante le prime ore di giorno 21 ottobre: le zone di colore bianco sono porzioni di territorio in cui risulta assenta la copertura del radar.



Elaborazione dei Dati

I dataset disponibili

I dati, relativi all'area di interesse nei giorni compresi tra il 19 e il 24 ottobre 2019, che sono stati presi in considerazione in questo studio, sono:

- Dati relativi alle scariche elettriche, prodotti dalla rete di rilevamento delle fulminazioni, denominata *Lampinet* (Tabella 0.1), facente capo all'Aeronautica Militare Italiana. In particolare, la rete impiegata è costituita da quindici stazioni di osservazione che operano nella gamma delle basse e bassissime frequenze, distribuite sul territorio nazionale, e da più elaboratori di dati installati presso il CNMCA (Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica). Le informazioni prodotte da quest'ultima, sono fornite sotto forma di elenco in ordine cronologico (Figura 0.2) e contengono per ogni scarica rilevata dai sistemi di monitoraggio: coordinate geografiche, ora di accadimento, polarità e intensità

Date and time	Latitude	Longitude	Discrimination	Signal (kA)
2019/10/19 09:38:30.835	43,73628	7,589837	CG-	-34
2019/10/19 10:12:01.011	43,91188	7,594264	CG+	17
2019/10/19 10:14:06.428	43,87229	7,525823	CG-	-85
2019/10/19 10:14:06.507	43,87043	7,494752	CG+	47
2019/10/19 10:20:41.431	43,9432	7,65435	CG-	-51
2019/10/19 10:20:41.613	43,98497	7,632547	CG+	15
2019/10/19 10:20:41.876	43,91528	7,57456	CG-	-16
2019/10/19 10:23:40.602	43,93087	7,600037	CG-	-15
2019/10/19 10:25:14.778	43,90268	7,849803	CG+	82
2019/10/19 10:25:15.172	43,95234	7,544506	CG-	-16
2019/10/19 10:26:54.688	43,92246	7,581859	CG-	-26
2019/10/19 10:30:27.013	43,98641	8,138502	CG+	25

Figura 0.2 - Esempio di formato con cui vengono forniti i dati relativi alle fulminazioni.



Tabella VI.1 - Caratteristiche della rete di rilevamento delle fulminazioni Lampinet, facente capo all'Aeronautica Militare Italiana.

Nome della Rete	Lampinet
Proprietà	CNMA
Numero di sensori	15
Range di frequenze	VLf - LF
Location accuracy (LA)	500 m
Detection efficiency (DE)	90% (CG) - 30-40% (IC)
Tecnica di localizzazione	MDF +TOA
Ente pubblico/privato	Pubblico
Applicazione	Protezione Civile, Aeronautica Militare
Sito internet	http://www.meteoam.it
Periodo di attività	2004 - oggi

- Dati pluviometrici, forniti da ARPA Piemonte, gestore della rete pluviometrica di monitoraggio al suolo che ricopre omogeneamente il territorio regionale, mediante una rete di stazioni comprendente a quattrocento unità (Figura 0.3). Tali dati sono relativi alle altezze di pioggia misurate su tutta la rete al suolo, e campionati mediante un intervallo di temporale di dieci minuti.

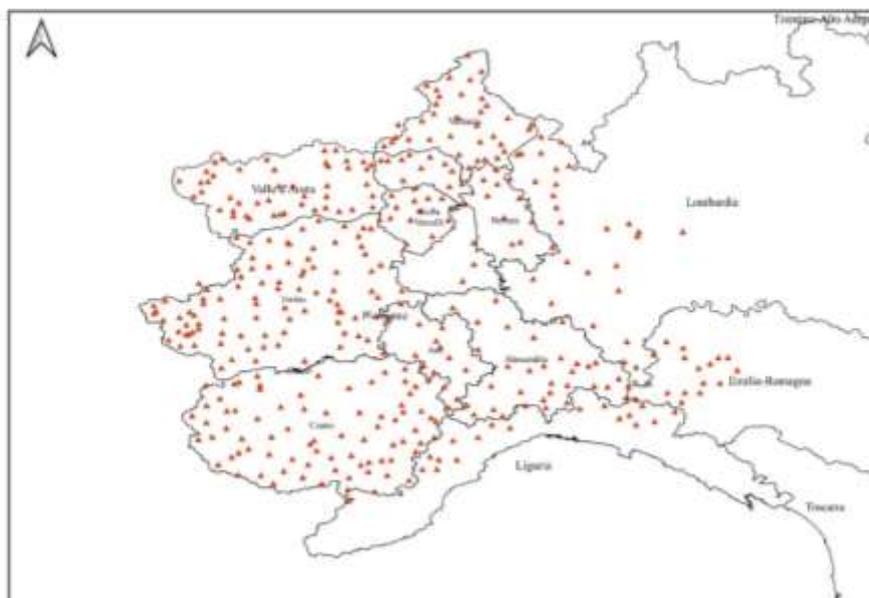


Figura 0.3 - Mappa dei pluviometri (triangoli in rosso) costituenti la rete delle stazioni di monitoraggio al suolo, gestita dai ARPA Piemonte.

- Dati di pioggia sotto forma di SRI (*Surface Rainfall Intensity*), forniti dai Centri Funzionali del Dipartimento di Protezione Civile, ottenuti dalla rete di 23 stazioni di radar meteorologico. Questi dati sono relativi alla quasi totalità dell'estensione del territorio nazionale e sono relativi ad un campionamento temporale che avviene ogni dieci minuti, e rappresentano la precipitazione stimata mediante applicazione della legge di Marshall&Palmer (1948) su di un valore di riflettività, che è identificato come valore medio ponderato sulla qualità lungo la verticale di ogni cella polare, (Figura 0.4). Successivamente, questi sono stati riportati, mediante un procedimento inverso, in dati di riflettività (Z).



Figura 0.4 - Esempio di dato di output della rete di stazioni radar meteorologiche, mappa del fattore SRI (*Surface Intensity Rainfall*).

La definizione dell'area di interesse

In letteratura scientifica, è stato valutato il problema della risoluzione spaziale ottimale che deve essere utilizzata per effettuare studi relativi alla correlazione tra precipitazioni e fulminazioni. Tra questi compare quello condotto da Soula&Chauzy (2001), in cui si afferma che la risoluzione ottimale, per quanto riguarda l'impiego del dato delle scariche nube-suolo, risulta essere di 30 km x 30 km, ma nella definizione di questa area non si tiene conto del fatto che le fulminazioni non si trovano mai in corrispondenza del nucleo convettivo, ma si posizionano sempre perimetralmente. Successivamente, altre pubblicazioni scientifiche sono state incentrate sul problema della definizione dell'estensione dell'area di studio, un esempio è Kotroni&Lagouvardos, (2008).



In questo lavoro di ricerca, si procede con un'analisi della correlazione spaziale tra i dati di pioggia, di numerosi eventi convettivi, e i dati dell'attività elettrica, verificatasi durante gli stessi, e si raggiunge la conclusione che la massima correlazione statistica significativa è possibile ottenerla mediante l'impiego di dati di scariche elettriche che ricadono in un'area circolare, di un raggio medio di 15 km, intorno ad ognuna delle stazioni pluviometriche della rete considerata. Per la definizione dell'area di studio, si sono tenute in conto le considerazioni riportate in letteratura scientifica, e si è scelto di procedere considerando un campionamento dei pluviometri che ricadono in un territorio con un'estensione pari a 30 km x 30 km, mentre per l'area di campionamento delle scariche elettriche si è scelta un'estensione maggiore di 15 km, ottenendo quindi un'area di 45 km x 45 km, (Tabella VI.2). In questo caso si è scelto di non considerare i dati ricadenti nell'intorno di 15 km di ogni pluviometro, come avviene in Kotroni&Lagourvados (2008), poiché la rete pluviometrica del Piemonte risulta abbastanza fitta, e le aree circolari si sovrapporrebbero, e molti pluviometri identificati ricadono nella parte perimetrale del poligono definito, dunque risulta maggiormente agevole considerare un'area regolare piuttosto che un insieme di aree circolari centrate su ognuna delle stazioni.

Tabella VI.2 - Latitudine e Longitudine degli estremi dell'area di campionamento dei dati pluviometrici e delle fulminazioni.

Estensione Area di Campionamento (coordinate WGS 84)					
Dati	N_{max}	N_{min}	E_{max}	E_{min}	Area
Pluviometrici	44.9	44.6	9	8.7	30 x 30 km
Fulminazioni	45.02	44.48	9.12	8.48	45 x 45 km

Di seguito in Figura 0.5, si riporta l'area di studio considerata, in blu è rappresentata quella identificata per il campionamento delle scariche elettriche, e in rosso quella per il campionamento dei dati di pioggia.

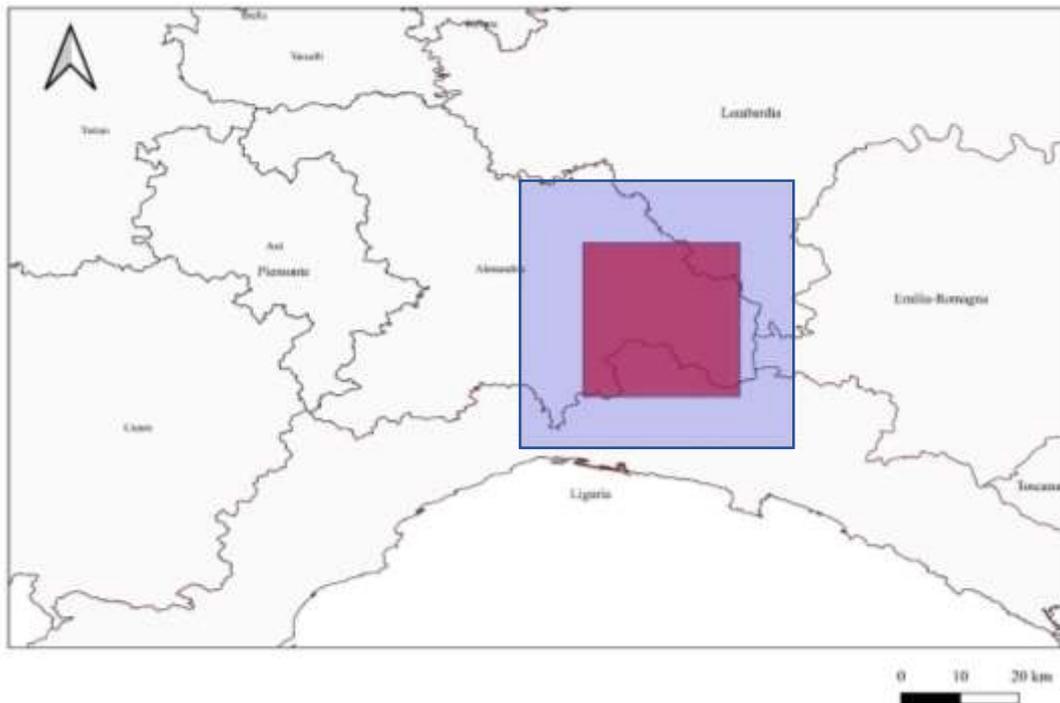


Figura 0.5 - Inquadramento dell'area di interesse. In rosso è riportata l'area di campionamento dei dati pluviometrici, in blu l'area di campionamento delle fulminazioni.

La modalità di trattazione dei dati

Una volta definita l'area di interesse, si è proceduto al campionamento dei *dataset* dei soli dati che ricadono nei territori e nell'intervallo temporale oggetto di studio, e alla loro elaborazione al fine di procedere, per ogni evento precipitativo, con l'analisi della correlazione: frequenza-intensità, temporale, spaziale e quantitativa.

I dati relativi alle scariche elettriche, rilevati dalla rete facente capo dal COMet, sono stati forniti sotto forma di elenco, in ordine temporale, di tutte le scariche elettriche con le relative caratteristiche (data, tempo di accadimento, coordinate, polarità, intensità) che si sono verificate tra il 19 e il 23 ottobre 2019 nei territori del Piemonte e della Liguria. Per sfruttare tale tipologia di informazione per le successive analisi comparative, i dati sono stati sottoposti a delle semplici elaborazioni che è possibile riassumere in due step successivi:

1. *Ritaglio dei dati sull'area d'interesse*

Una volta identificate le coordinate geografiche che rappresentano i vertici dell'area dello studio, è stato implementato un semplice script su *Matlab* che permette di identificare per ogni *dataset* i soli dati il cui valore delle relative coordinate geografiche (latitudine e longitudine) è compreso fra i valori estremi dall'area definita in precedenza, Tabella VI.2.



2. Costruzione delle serie delle scariche elettriche

Mediante i soli dati ricadenti nell'area d'interesse, si sono costruite delle serie temporali in cui viene descritta la frequenza delle fulminazioni (totali, positive e negative), registrate lungo l'intera estensione della zona dello studio, in funzione del tempo. Per permettere il confronto, da un punto di vista qualitativo e quantitativo, con i dati di pioggia, che sono registrati cadenza di dieci minuti, si è scelto un intervallo di campionamento delle scariche elettriche di uguale entità.

I dati pluviometrici, forniti da ARPA Piemonte sono stati anch'essi soggetti ad una elaborazione. In questo caso sono stati forniti i dati sotto forma di serie temporali, con campionamenti con intervalli di dieci minuti, relative ad ognuno dei quattrocento pluviometri della rete. Per questi dati si è proceduto nel seguente modo:

1. Ritaglio dei dati sull'area d'interesse

Mediante un codice implementato su *Matlab*, sono stati identificati i pluviometri le cui coordinate geografiche ricadono nell'area di interesse, e quindi i cui valori, in termini di coordinate geografiche, sono compresi tra i valori di latitudine e longitudine del perimetro di tale area.

2. Costruzione della serie dell'altezza di pioggia media

Le serie relative ai pluviometri attivi ricadenti nella zona di campionamento, identificate nei passaggi precedenti, sono state utilizzate per procedere con la costruzione di un'unica serie temporale relativa all'intero territorio, costituita per ogni intervallo ($\Delta t=10$ minuti) da un valore medio dell'altezza di pioggia, ottenuto mediante (Equazione 6.1):

$$D_p = \frac{1}{n} \sum_i d_i \quad (\text{Equazione 6.1})$$

Dove:

- D_p è l'altezza di pioggia media sull'intera area, di estensione 30 km x 30 km;
- d_i l'altezza di pioggia registrata dai pluviometri attivi presi in considerazione, per ogni intervallo $\Delta t=10$ minuti;
- n è il numero dei pluviometri attivi sull'area di interesse.

I dati radar di pioggia, sotto forma di SRI, prodotti dalla rete di radar meteorologici appartenenti ai Centri Funzionali di Protezione Civile, non sono stati trattati in alcun modo. Infatti, tali informazioni sono state visualizzate mediante software GIS e confrontati con le scariche elettriche, per effettuare delle considerazioni qualitative della correlazione spaziale dei due fenomeni.



Presentazione e Discussione dei Risultati

Relazione intensità di pioggia - frequenza delle fulminazioni

A partire da sabato 19 ottobre si sono verificate nel Basso Alessandrino, in corrispondenza dello spartiacque tra Liguria e Piemonte, delle precipitazioni diffuse, a carattere prevalentemente di rovescio temporalesco, che sono perdurate anche lungo la mattinata di giorno 20, intensificandosi in maniera spiccata soltanto nel pomeriggio della stessa giornata. Nel pomeriggio della domenica, la rete di monitoraggio delle fulminazioni *Lampinet* ha iniziato a registrare i primi dati relativi alle scariche elettriche (*cloud-to-ground*), rilevando un massimo relativo alla frequenza di accadimento proprio in corrispondenza dell'intervallo temporale del picco delle precipitazioni misurate dalla rete pluviometrica, ovvero nelle ore centrali del pomeriggio. Successivamente, durante la fase di dissipazione del fenomeno temporalesco, non è stata più registrata alcuna attività elettrica.

Durante la giornata del 21 ottobre si sono generate due diverse strutture temporalesche organizzate. La prima durante le prime tre ore del mattino di tipo MCS (*Mesoscale Convective System*), accompagnata anche in questo caso da un aumento della frequenza delle fulminazioni, evoluta poi in una in una tempesta di fulmini. Successivamente, dopo questo primo episodio di natura convettiva, nella mattinata di lunedì le precipitazioni si sono mantenute per lo più a carattere avvertivo, senza il verificarsi di alcun tipo di fulminazione. Nel pomeriggio della stessa giornata, un altro sistema convettivo, in questo caso *V-shaped*, si è formato sul Golfo Ligure e si è quindi spostato molto velocemente all'interno dell'imbuto verso l'entroterra Ligure, tra Rossiglione e Gavi, crescendo ulteriormente grazie all'effetto orografico dei primi rilievi appenninici e rimanendo quasi-stazionario in quell'area per circa dodici ore. Solo nelle ore prima dell'alba di martedì, il sistema convettivo è arretrato verso il Savonese per poi esaurirsi velocemente, con precipitazioni sempre più deboli sparse e in generale esaurimento ovunque nella mattinata di martedì.

Nelle prime ore di mercoledì 23, si sono verificate delle deboli precipitazioni, sempre a carattere convettivo che però non hanno avuto un riscontro dal punto di vista dell'attività elettrica.

Dunque, il settore sud-orientale del Piemonte, è stato maggiormente soggetto al verificarsi di scariche elettriche nei giorni del 20/10/2019, 21/10/2019 e 22/10/2019 i giorni che, come descritto precedentemente nel quadro meteorologico dell'evento, è possibile identificarli come i giorni maggiormente critici per le piogge e i relativi effetti al suolo, Figura 0.6.

Nei giorni 19 e 23 ottobre, in cui si sono registrate piogge meno intense nei territori d'interesse, non sono state rilevate scariche elettriche.



In generale, quindi il fenomeno delle fulminazioni è presente soltanto quando le precipitazioni, sempre a carattere temporalesco sono più intense, per valori di pioggia poco rilevanti, seppur di natura convettiva, non si rilevano scariche elettriche.

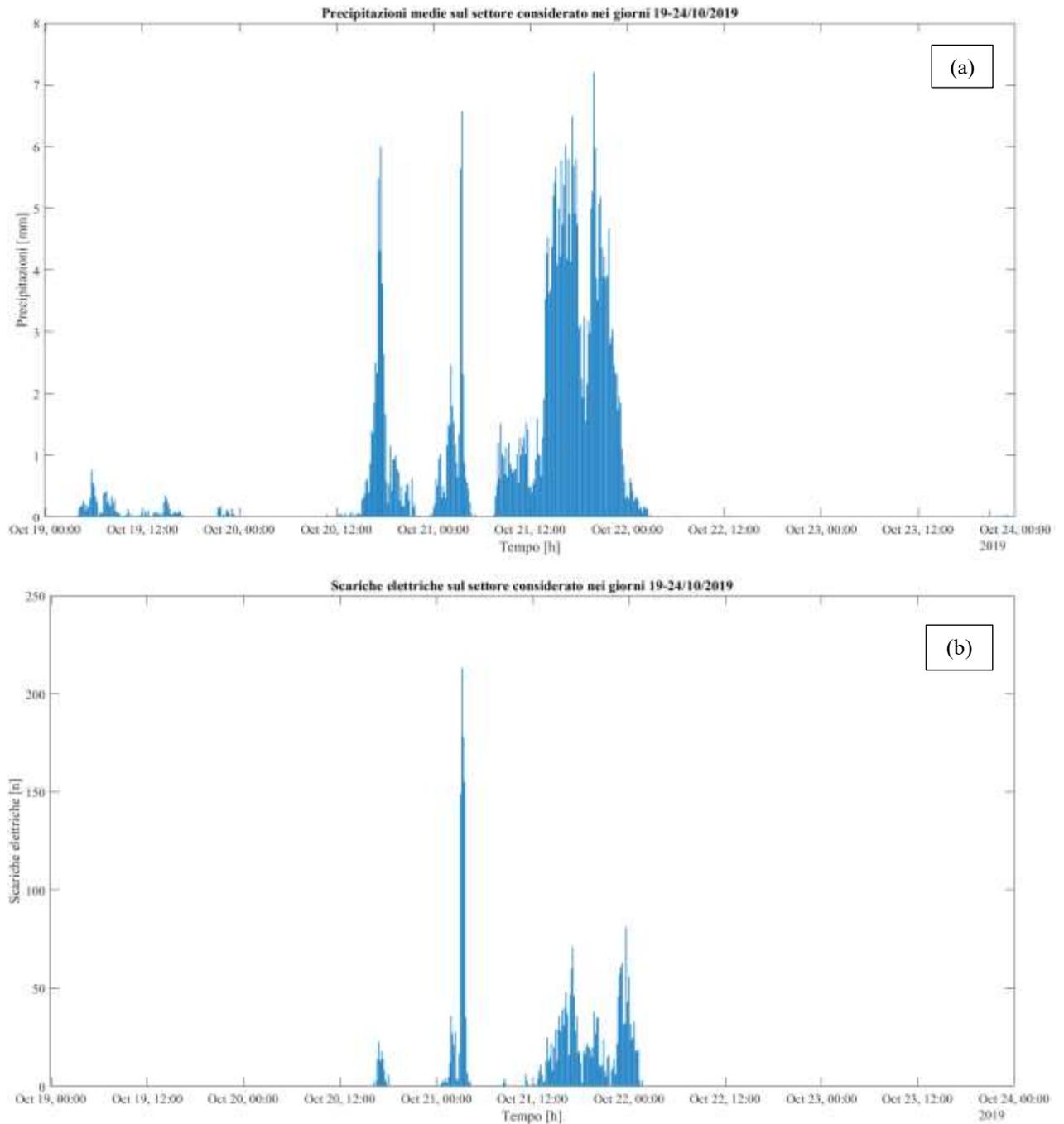


Figura 0.6 – Evoluzione delle precipitazioni (a) e delle scariche elettriche (b) nei giorni 19-24 ottobre, nei territori d'interesse.



Per valutare, sotto un punto di vista qualitativo, se esiste una relazione tra l'intensità delle precipitazioni e l'incremento della frequenza delle fulminazioni è stata effettuata un'analisi valutando l'evoluzione dei due fenomeni, in particolare considerando:

- La serie dell'altezza di pioggia media sull'intera area di interesse, per intervalli di dieci minuti, dal 20 ottobre al 22 ottobre.
- Le serie relative alla frequenza delle scariche elettriche, sia positive che negative, registrate in corrispondenza della regione considerata, per intervalli di 10 minuti, dal 20 al 22 ottobre.

Si riporta di seguito, Figura 0.7, il grafico utilizzato per l'analisi comparativa delle due serie temporali, relative ai due differenti fenomeni:

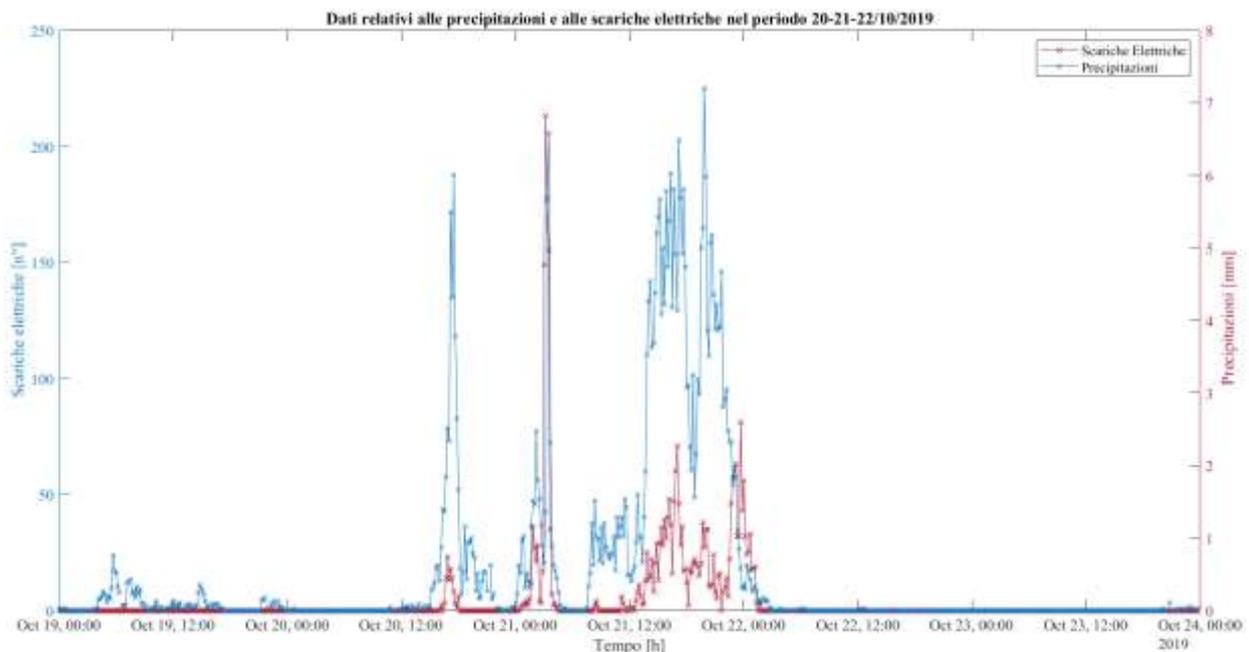


Figura 0.7 - Serie di pioggia e delle fulminazioni relative al periodo 20-21/10/2019.

Da questa analisi preliminare, è possibile notare come a picchi di precipitazioni corrispondono picchi della frequenza delle scariche elettriche, dunque la loro intensità risulta fortemente connessa, come già fatto notare in Battan, (1965). È però necessario sottolineare, che non vi è una diretta proporzionalità, ed esiste una sorta di valore limite affinché si verifichi tale relazione, infatti le fulminazioni sono presenti soltanto quando connesse a precipitazioni di una certa entità, che nel caso in oggetto risulta pari ad un'altezza di pioggia media pari a 1 mm.

Analizzando l'andamento delle due curve è possibile notare, inoltre, quanto questo sia simile sia in fase crescente, che di picco, mentre nella fase di dissipazione i due fenomeni risultano "slegati", come già documentato in letteratura scientifica.



Questo risulta in maniera maggiormente evidente durante le code del secondo evento verificatosi giorno 21 (nella sera di giorno 21 e le prime ore di giorno 22). In particolare, in questo caso è possibile notare un picco della frequenza delle fulminazioni non legato ad un picco dell'intensità delle precipitazioni. Per comprendere il perché di questa evoluzione tanto differente, si è deciso di indagare su cosa accade durante la fase dissipativa mediante la visualizzazione dei dati mediante l'impiego di software di tipo GIS. Da un'analisi qualitativa effettuata mediante la visualizzazione dei dati, emerge che: durante la notte del 22, il nucleo convettivo si è spostato velocemente dai territori del Basso Alessandrino in direzione Sud-Ovest, verso i territori posti al confine tra le Province di Genova e Savona, e le fulminazioni hanno seguito la stessa traiettoria, mantenendosi però sempre ad una determinata distanza, e risultando quindi esterne rispetto alla zona di massima riflettività. In corrispondenza della mezzanotte, il nucleo temporalesco è traslato al di fuori dell'area considerata per il campionamento dei dati pluviometrici (in rosso in Figura 0.5), mentre le relative fulminazioni, che si mantengono sempre perimetrali rispetto i fenomeni precipitativi, ricadono ancora nell'area di campionamento delle fulminazioni, che ha estensione maggiore, 45 km x 45 km, (in blu in Figura 0.5), (Figura 0.8). Tale anomalia è dunque una limitazione dettata dal fatto che si è scelto di condurre lo studio adottando un punto di vista euleriano: le aree di studio considerate sono centrate su un determinato territorio e rimangono stazionarie nella loro posizione, mentre gli eventi analizzati sono soggetti ad evoluzioni e spostamenti molto veloci. Ovviamente questa tipologia di errore visibile lungo le code dell'evento non è possibile eliminarla, se non mediante delle metodologie di trattamento di dati di tipo lagrangiano, più precise ma maggiormente onerose da un punto di vista computazionale.

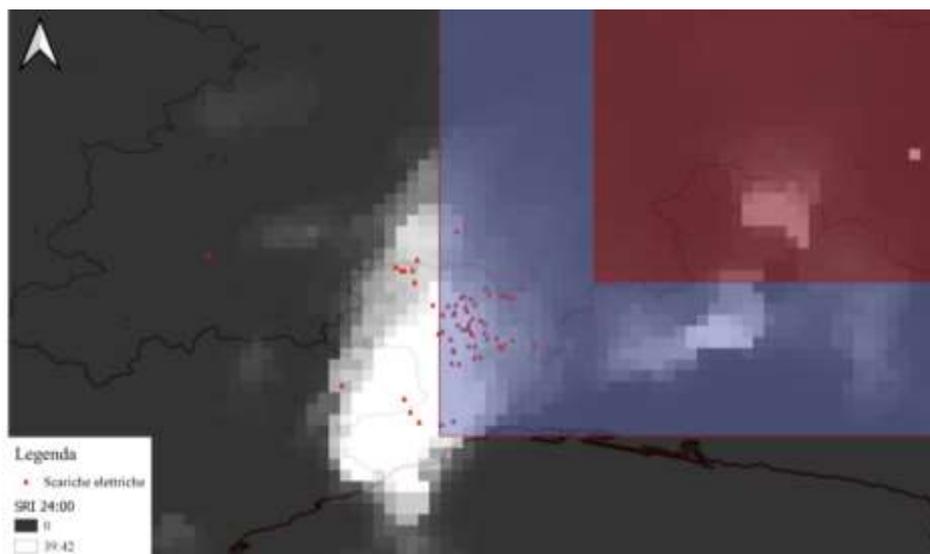


Figura 0.8 – Dettaglio (estremo S-O) della mappa della pioggia (SRI) e delle scariche elettriche registrate in corrispondenza della mezzanotte di giorno 22, e le area studio identificate per le precipitazioni (in rosso) e le fulminazioni (in blu).



Correlazione temporale tra precipitazioni convettive e fulminazioni

In letteratura scientifica, più studi hanno dimostrato che la frequenza dei fenomeni *cloud-to-ground* tende a raggiungere il picco pochi minuti prima della pioggia (Piepgrass et al., 1982, Tapia et al., 1998). Si è deciso, quindi, di analizzare la correlazione temporale, al fine di ricercare se esiste ed è osservabile il ritardo tra i picchi di pioggia e delle scariche elettriche, più volte documentato, anche per il territorio italiano e in corrispondenza di tre differenti tipologie di eventi convettivi.

Per comprendere meglio l'evoluzione nel tempo dei due fenomeni messi a confronto e valutarne la correlazione temporale, si è deciso di studiare singolarmente ognuno dei tre fenomeni temporaleschi, che si sono susseguiti nei giorni considerati:

1. L'evento temporalesco, dettato da fattori orografici, verificatosi durante il pomeriggio di domenica 20 ottobre;
2. L'evento convettivo, di tipo MSC, verificatosi nelle prime ore di giorno 21 ottobre;
3. L'evento convettivo, di tipo *V-shaped*, verificatosi tra il pomeriggio di giorno 21, fino alle prime ore del giorno 22.

Una volta identificati e isolati i tre fenomeni temporaleschi, è stata effettuata una prima valutazione, di natura qualitativa, mediante l'impiego di grafici in cui si riportano le serie di dati relativi ai due fenomeni (altezze di pioggia media e frequenza delle scariche elettriche, campionate per intervalli di dieci minuti) sul settore considerato, (Figura VI. 9-14).

Tale analisi, ha permesso di osservare l'esistenza di un ritardo, tra il picco della frequenza delle scariche elettriche e quello delle altezze di pioggia. Successivamente, si è proceduto con uno studio della *lag-correlation* per valutare, sotto un punto di vista quantitativo, il ritardo che intercorre tra i due fenomeni. In particolare, per ogni episodio di pioggia, si è fatto variare il ritardo (da +0 minuti a +30 minuti) fra le serie relative ai due fenomeni, alla ricerca del ritardo ottimale che permette di ottenere, mediante una regressione lineare dei dati, il valore maggiore del coefficiente di correlazione R^2 , (Tabella VI. 3-4-5).

Il tempo di latenza ottimale, delle precipitazioni rispetto alle fulminazioni, è risultato essere pari a 20 minuti, per tutti e tre gli episodi. Nell'ultimo caso, però, il parametro R^2 non assume un valore, significativamente elevato rispetto agli altri casi considerati, in quanto è possibile osservare una variabilità del tempo di latenza in accordo all'evoluzione del fenomeno di pioggia, infatti, questo risulta pari a: 20 minuti nella fase iniziale, 10 minuti nella fase di picco, e 30 minuti nella fase di dissipazione.

È necessario sottolineare che, i dati disponibili sono stati campionati per intervalli temporali pari a dieci minuti, per questo motivo lo studio del ritardo è proceduto mediante l'impiego di step di



eguale entità. Ovviamente, in caso di dati rilevati con una minore frequenza non si esclude il raggiungimento di risultati qualitativamente migliori con valori di latenza di diversa entità. Si riportano, in seguito, i dati di output che sono stati ottenuti per gli eventi considerati in relazione alla metodologia d'indagine descritta in precedenza.



1. 20 ottobre 2019

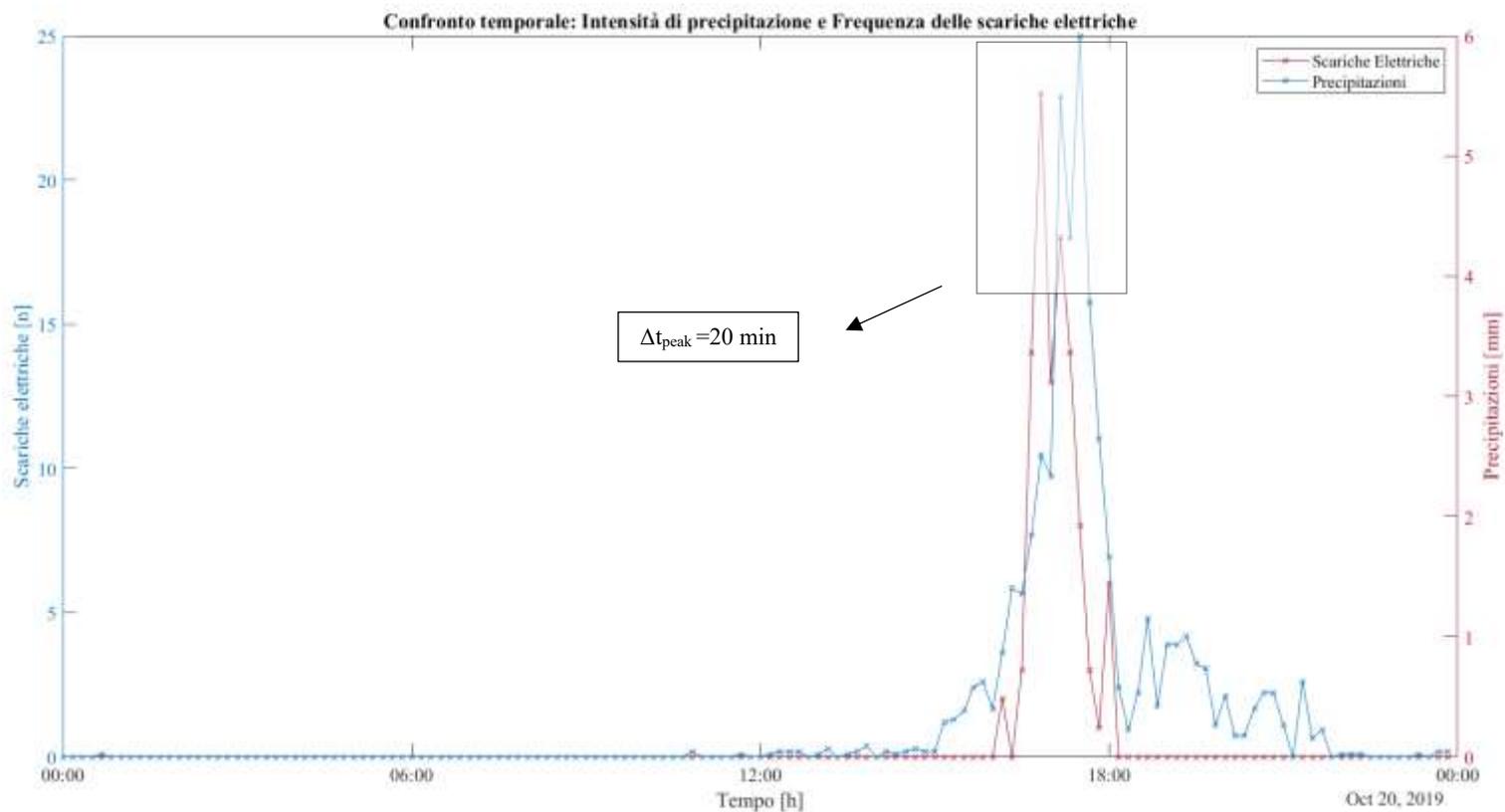


Figura 0.9 - Analisi temporale dell'intensità di pioggia e frequenza delle fulminazioni relative al 20/10/2019.



Tabella VI.3 - Valori di Δt e il corrispondente valore di R^2 per l'evento 1.

Δt_{peak} [min]	R^2
0	0.12
10	0.29
20	0.72
30	0.48

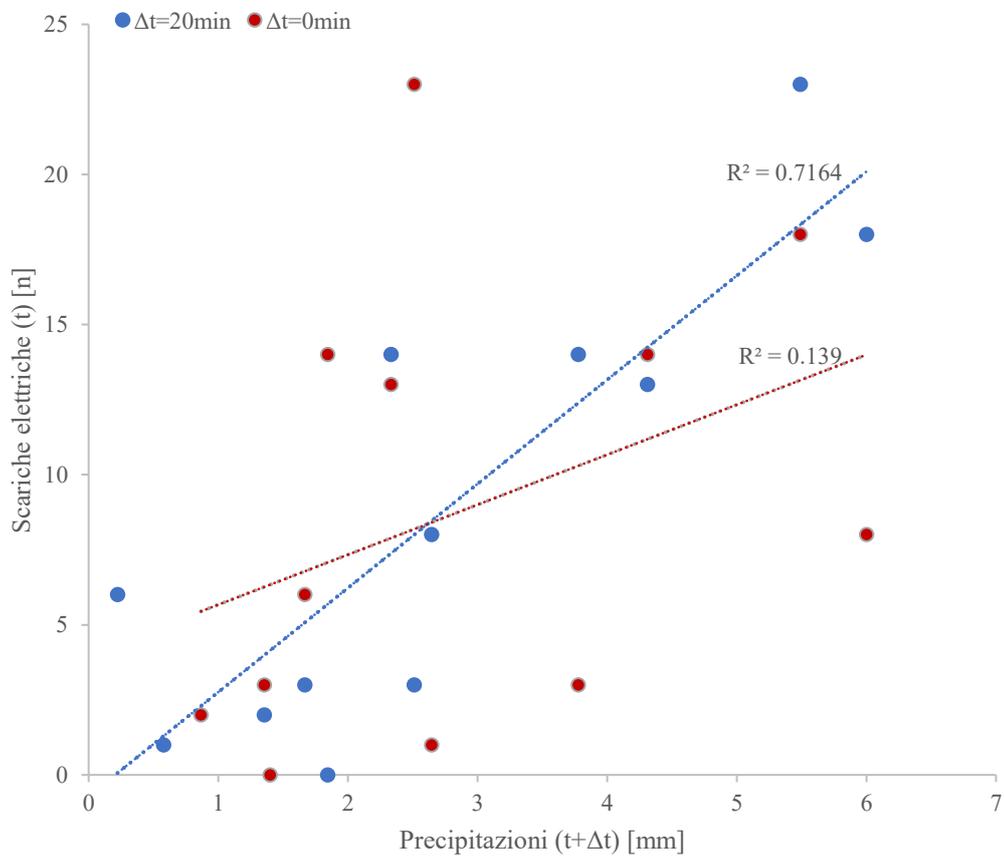


Figura 0.10 - Grafico relativo allo studio della correlazione temporale tra le precipitazioni e fulminazioni, registrate entrambe durante domenica 20 ottobre, in due diversi casi: 1) fenomeni che evolvono in sincrono, 2) fenomeni fuori sincrono con un ritardo ottimale.



2. 21 ottobre 2019

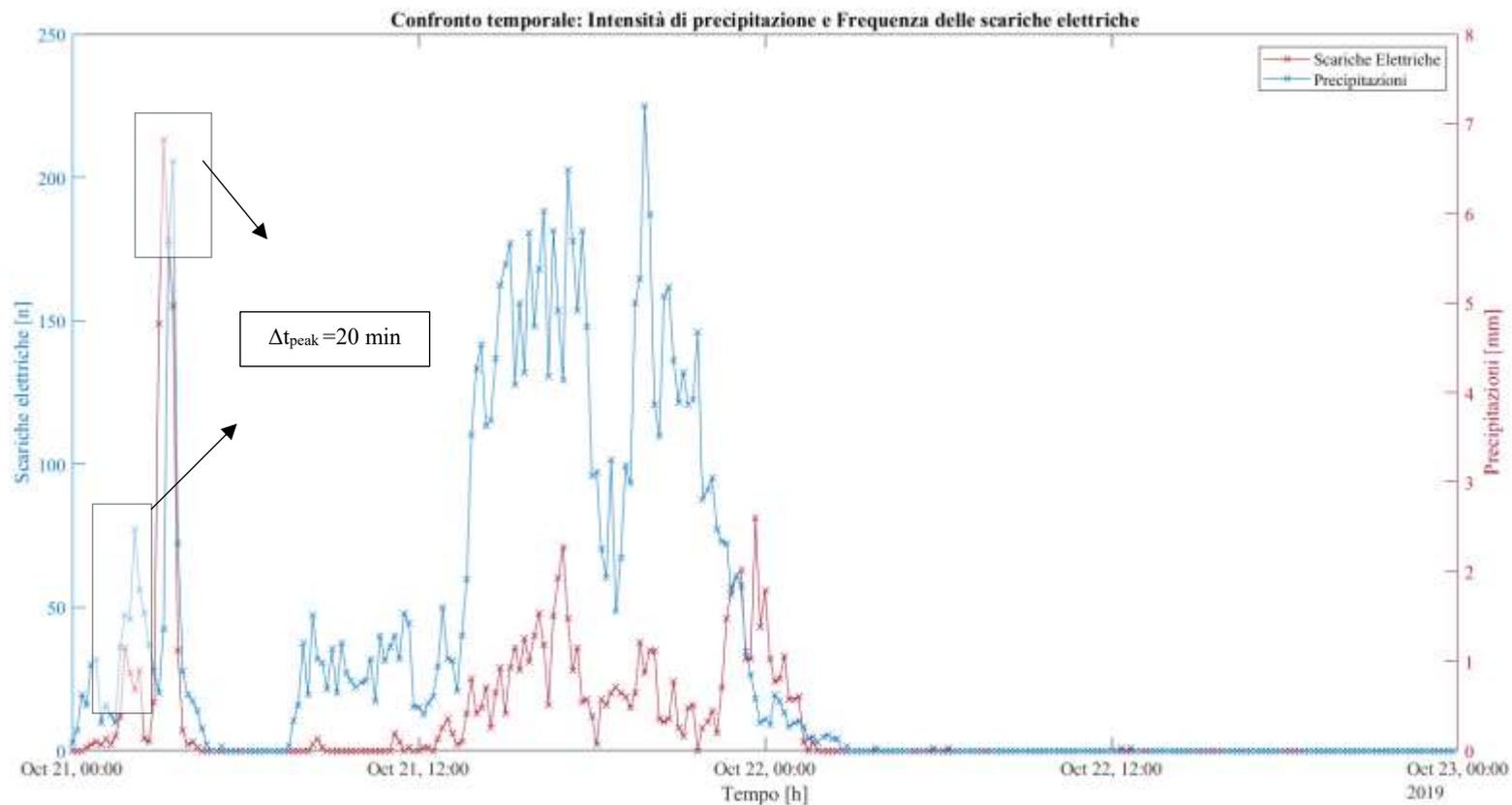


Figura 0.11 – Dettaglio del ritardo dei picchi del primo evento convettivo, analisi temporale dell'intensità di pioggia e frequenza delle fulminazioni relative al 21-22/10/2019.



Tabella VI.4 - Valori di Δt e il corrispondente valore di R^2 per l'evento 2.

Δt_{peak} [min]	R^2
0	0.02
10	0.64
20	0.95
30	0.26

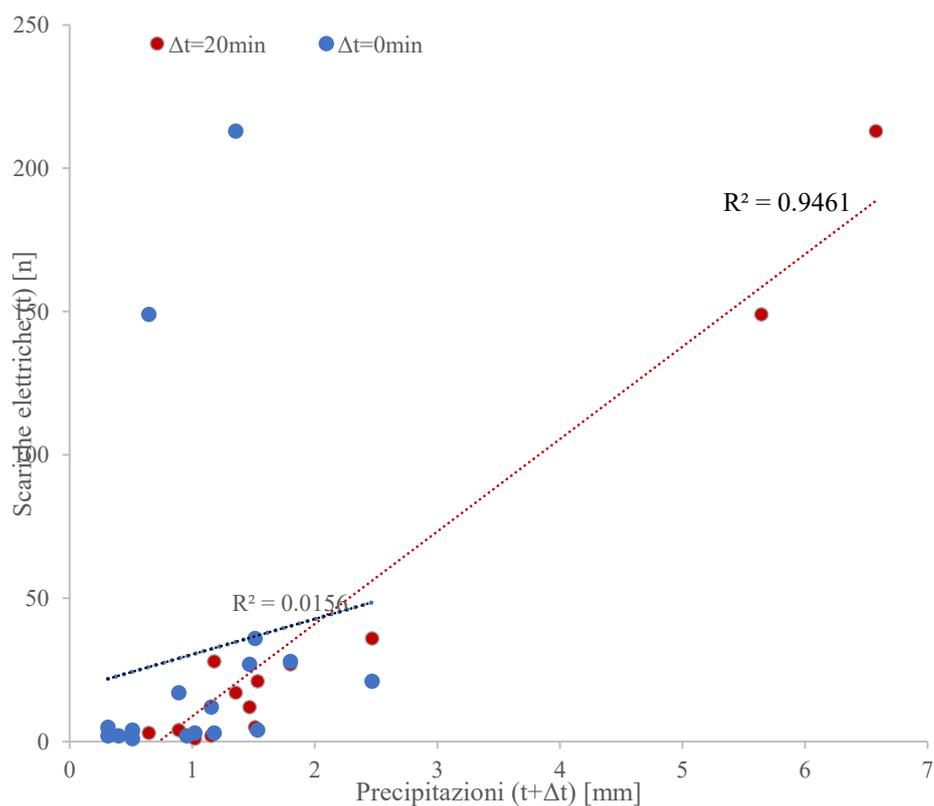


Figura 0.12 - Grafico relativo allo studio della correlazione temporale tra le precipitazioni e fulminazioni, registrate entrambe durante lunedì 21 ottobre (evento MSC), in due diversi casi: 1) fenomeni che evolvono in



3. 21-22 ottobre 2019

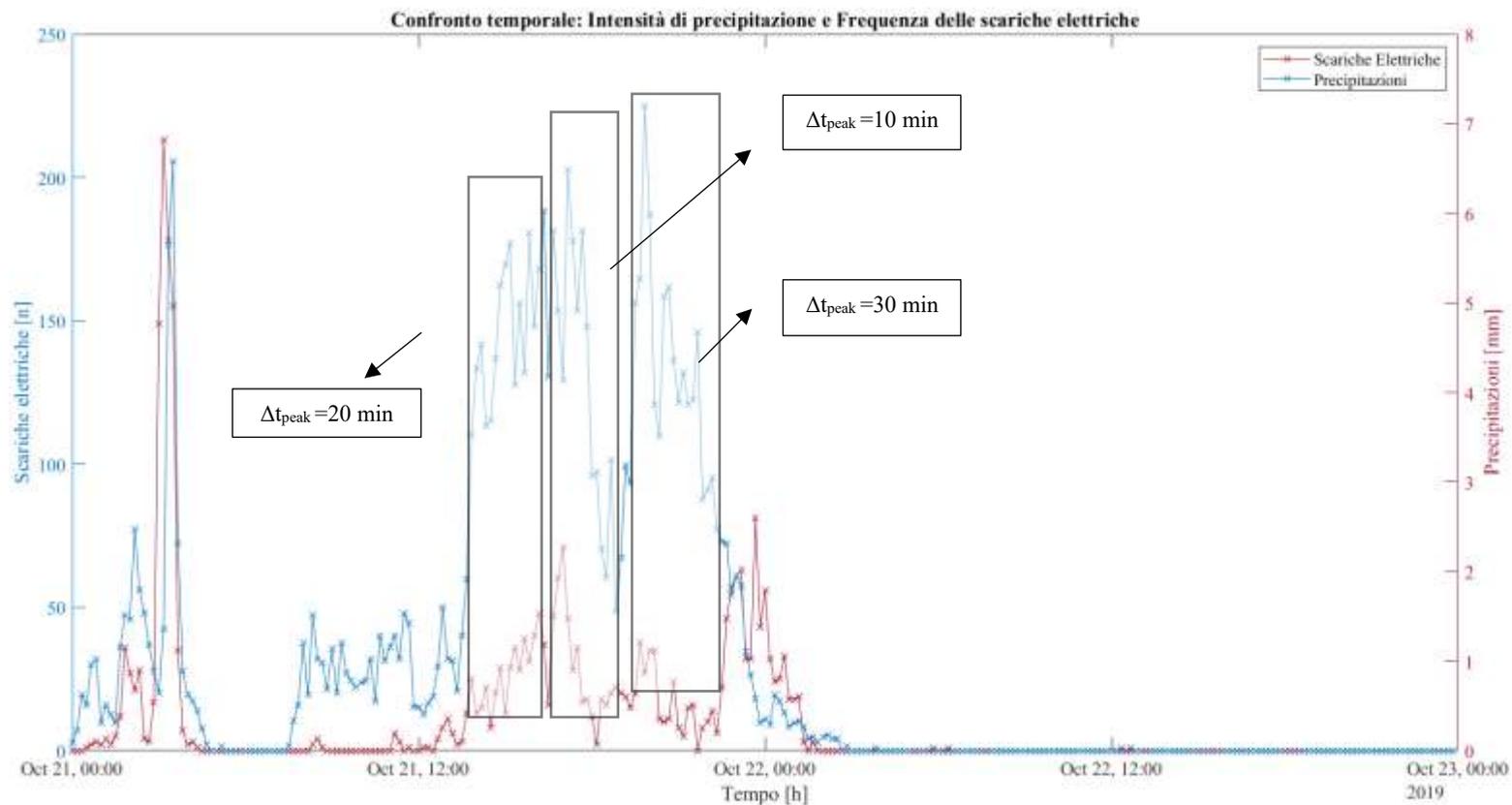


Figura 0.13 – Dettaglio del ritardo dei picchi del primo evento convettivo, analisi temporale dell'intensità di pioggia e frequenza delle fulminazioni relative a



Tabella VI.5 - Valori di Δt e il corrispondente valore di R^2 per l'evento 3.

Δt_{peak} [min]	R^2
0	0.55
10	0.57
20	0.60
30	0.50

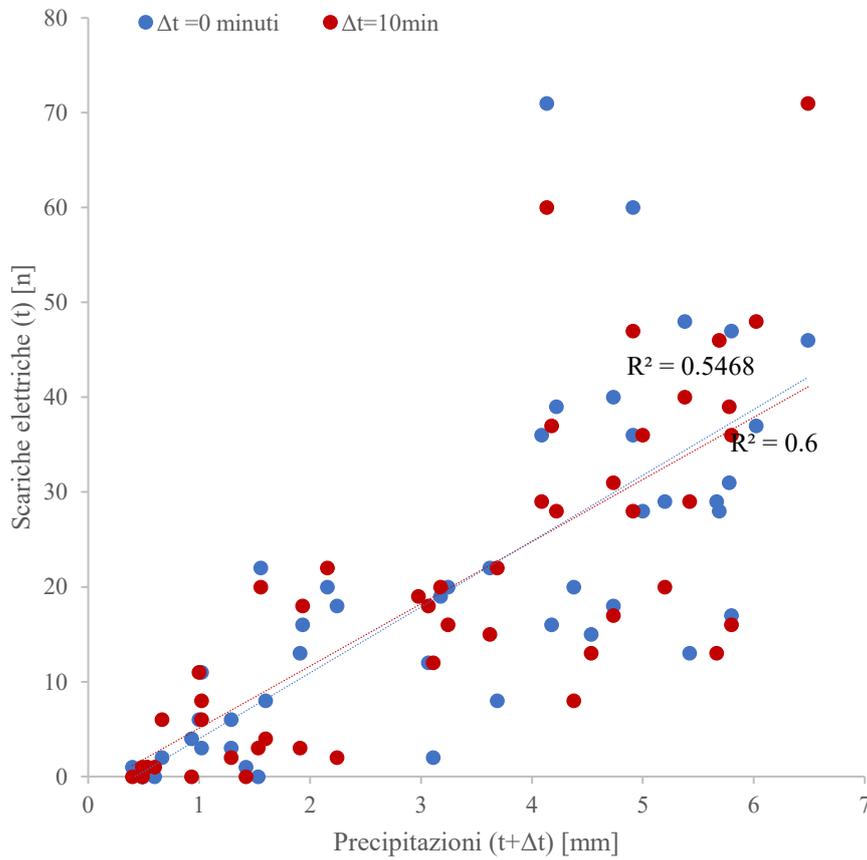


Figura 0.14 - Grafico relativo allo studio della correlazione temporale tra le precipitazioni e fulminazioni, registrate entrambe durante lunedì 21 ottobre (evento V-Shaped), in due diversi casi: 1) fenomeni che evolvono in sincrono, 2) fenomeni fuori sincrono.



Correlazione spaziale tra precipitazioni convettive e scariche elettriche

Nel paragrafo precedente, è stata individuata l'esistenza di un ritardo tra i picchi di precipitazione e quelli relativi alle scariche elettriche, che seppur soggetto ad una variabilità durante l'evoluzione di ogni evento, è possibile assumerlo mediante un valore medio pari a 20 minuti. Per l'applicazione però del fattore delle fulminazioni, come informazione aggiuntiva da integrare nei processi di previsione a breve termine di intensi eventi convettivi, si è valutata anche la correlazione spaziale, che lega questi due fenomeni. È stato, dunque, analizzato se esiste o meno una relazione tra la distribuzione delle precipitazioni e le fulminazioni, per comprendere come i fenomeni di pioggia e le scariche elettriche si dispongono spazialmente, e se l'osservazione di queste ultime può fornire, con un certo anticipo, informazioni sull'ubicazione dei nuclei convettivi, che si verificherà negli istanti successivi. Al fine di valutare la distribuzione spaziale, si è proceduto in maniera qualitativa attraverso la visualizzazione dei dati, per ogni intervallo temporale di dieci minuti, relativi alle mappe di pioggia in termini di SRI, e l'ubicazione delle scariche elettriche registrate venti minuti antecedenti. Dall'analisi si è osservato che effettivamente le fulminazioni si dispongono in maniera perimetrale attorno al nucleo convettivo, lungo l'intero corso dell'evento, anticipandone l'evoluzione della distribuzione nello spazio di circa 20 minuti. Quindi, è possibile ipotizzare che, l'osservazione delle scariche elettriche può fornire informazioni aggiuntive relative alla traiettoria delle celle convettive.

Si riportano di seguito alcuni esempi delle mappe generate durante l'analisi spaziale, in cui si sovrappongono le informazioni di pioggia e delle fulminazioni. Tra le 144 mappe che sono state prodotte, per ognuno dei tre giorni dell'evento, si riportano alcuni esempi in Figura VI. 15-16-17.

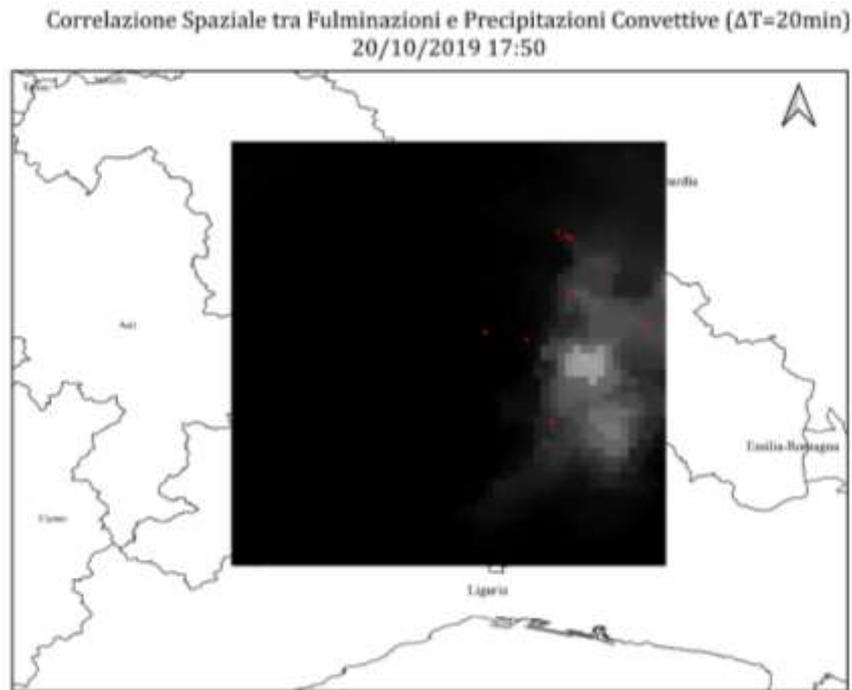


Figura 0.15 – Esempio di distribuzione spaziale delle precipitazioni e le scariche elettriche, registrate in corrispondenza dell'evento temporalesco di giorno 20/10/2019.

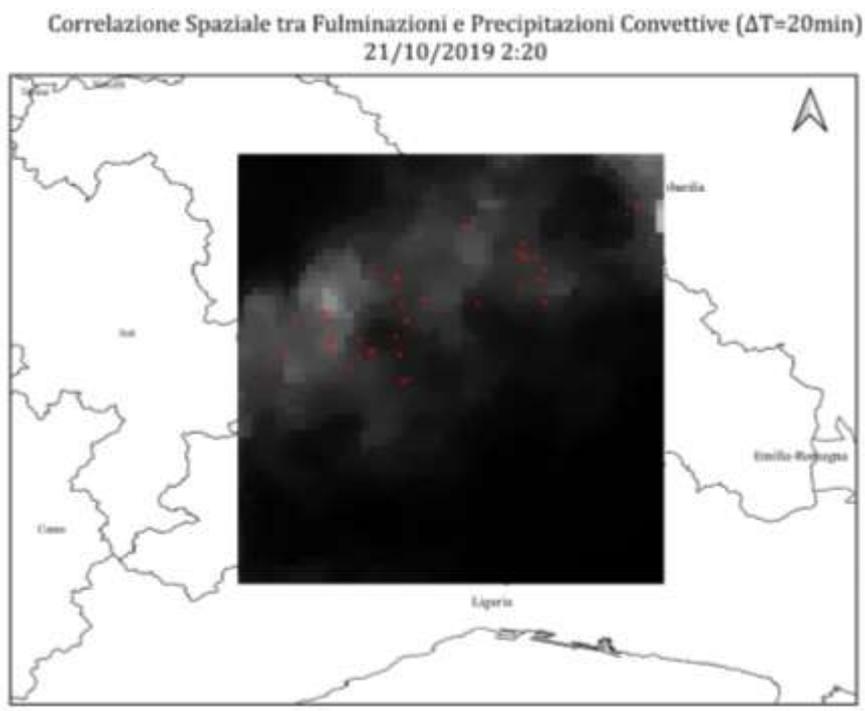
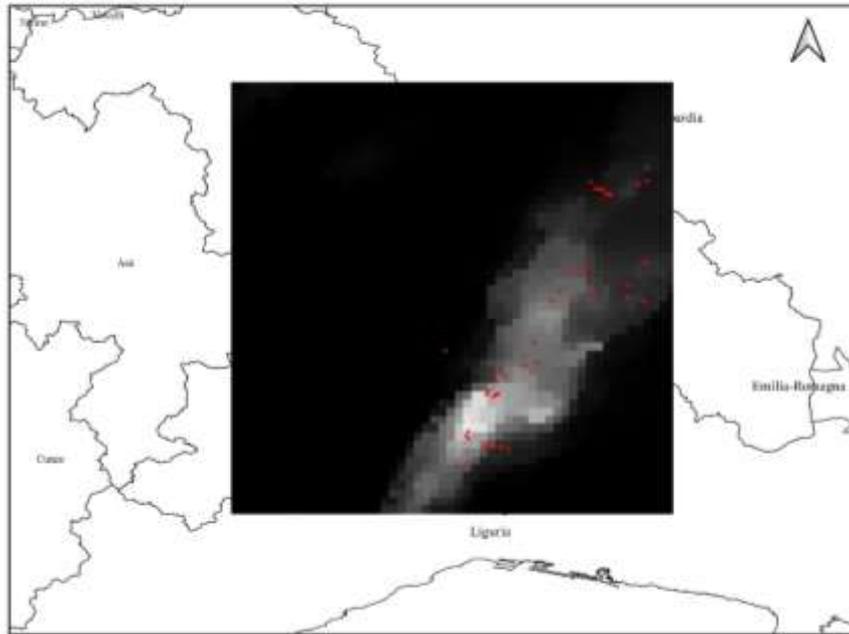


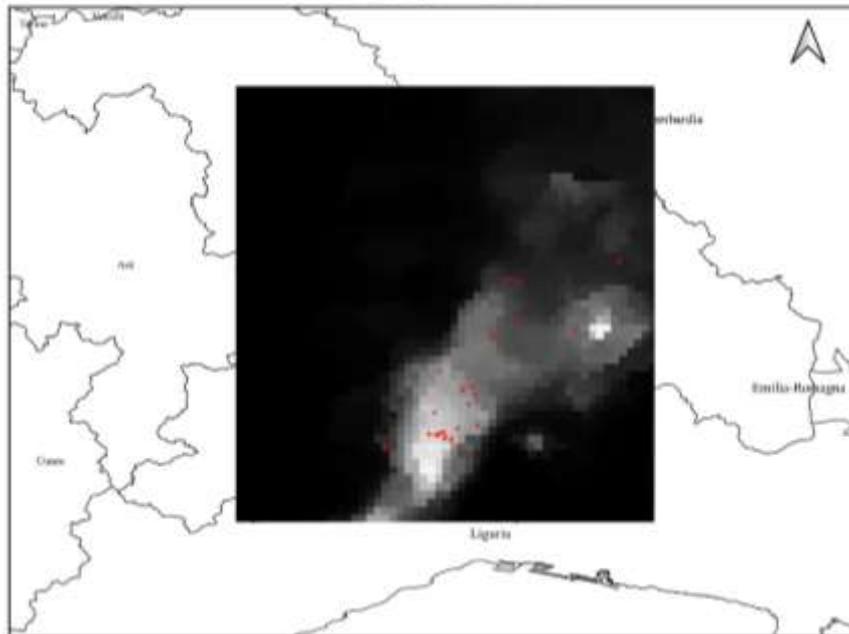
Figura 0.16 – Esempio di distribuzione spaziale delle precipitazioni e le scariche elettriche, registrate in corrispondenza dell'evento convettivo dettato dal sistema MSC di giorno 21/10/2019.



Correlazione Spaziale tra Fulminazioni e Precipitazioni Convettive ($\Delta T=20\text{min}$)
21/10/2019 16:0



Correlazione Spaziale tra Fulminazioni e Precipitazioni Convettive ($\Delta T=20\text{min}$)
21/10/2019 14:50



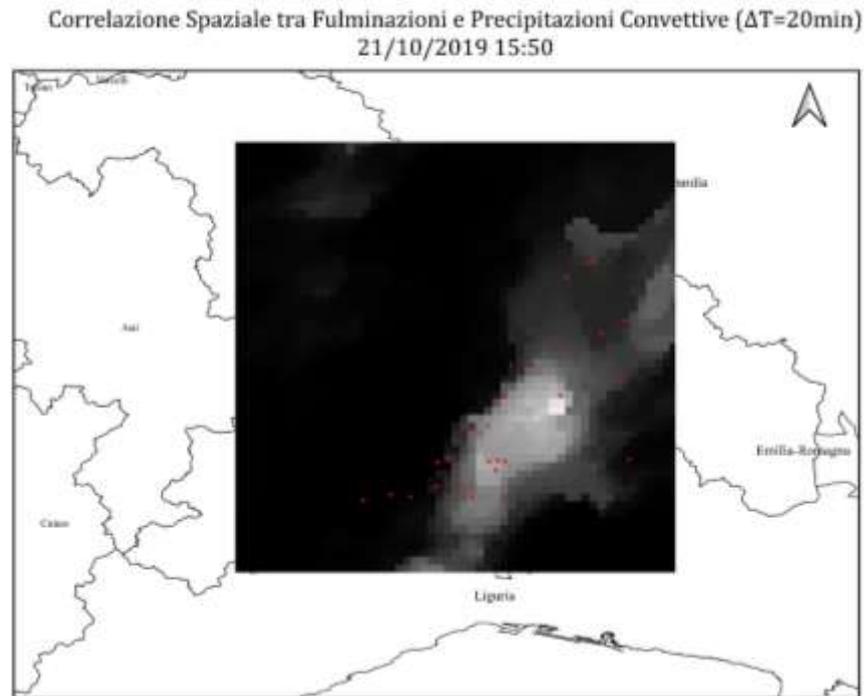


Figura 0.17 – Esempi di distribuzione spaziale delle precipitazioni e le scariche elettriche, registrate in corrispondenza di diversi intervalli temporali durante l'evento convettivo dettato dal sistema V-shaped di giorno 21/10/2019.

Relazione tra eventi di pioggia intensi e polarità delle scariche elettriche

Nella pubblicazione di Bonelli & Marcacci, (2008), emerge una relazione tra l'intervallo di massima frequenza di fenomeni elettrici con polarità positiva e l'innescio di fenomeni convettivi molto intensi. Tale risultato, è in accordo con quanto riportato da altri autori che hanno condotti studi simili in territori relativi al nord Italia, (Bertato et al., 2003, Bluestein et al., 1998). Ciò, permette di supporre che l'elevata incidenza delle scariche a polarità positiva può essere un segnale di avvertimento del verificarsi di precipitazioni estreme.

Nell'analisi degli eventi precipitativi si è, dunque, considerato il fattore polarità relativo ai fenomeni elettrici. La valutazione relativa alla ricorrenza delle fulminazioni, con polarità positiva, ha permesso di osservare che tali fenomeni si verificano soltanto in corrispondenza degli intervalli temporali che sono stati interessati agli eventi convettivi maggiormente intensi, e che hanno avuto maggiori effetti al suolo sui territori interessati. In particolare, è possibile notare un significativo incremento della frequenza di tali fenomeni durante gli eventi precipitativi più consistenti: nel pomeriggio di giorno 20, nelle prime ore del mattino (MSC) e nel pomeriggio fino alla tarda sera (*V-shaped*) di giorno 21 ottobre. Per precipitazioni di minori intensità, non si verificano eventi positivi ma sono comunque presenti eventi con polarità negativa.



Per precipitazioni poco rilevanti, nessuna tipologia di fulminazione viene rilevata dalle reti di monitoraggio, come evidenziato nei paragrafi precedenti.

Si riportano di seguito, per ogni evento convettivo, i grafici relativi al confronto dei dati della frequenza delle fulminazioni di segno positivo, e le precipitazioni medie sull'area di interesse, entrambi registrati per intervalli successivi di dieci minuti, lungo l'intero corso degli eventi esaminati, (Figura VI. 18-19-20).

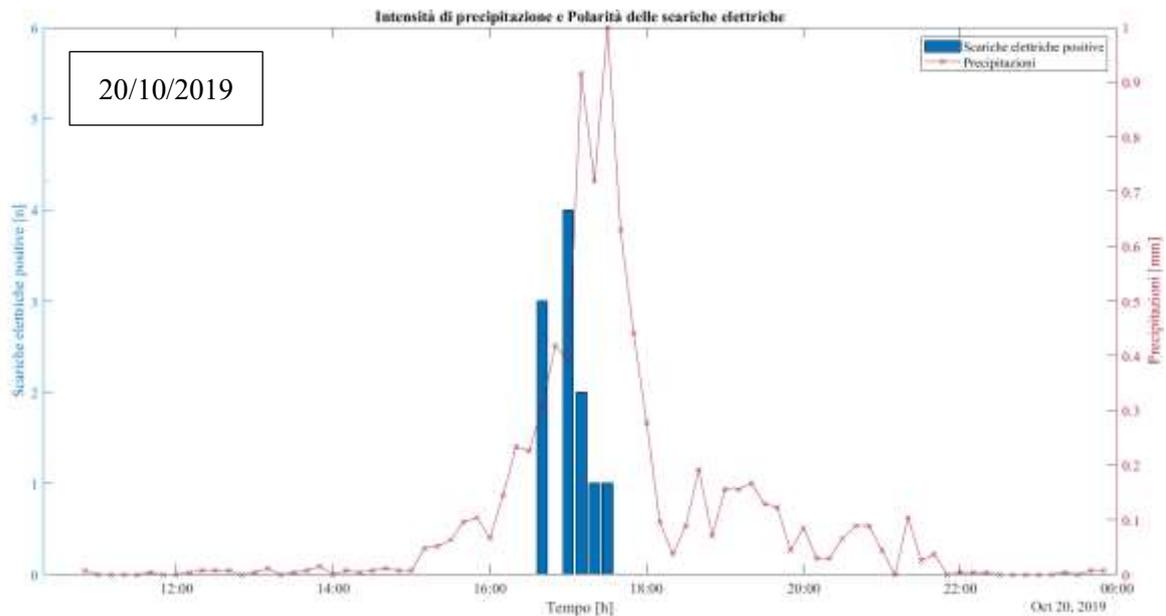


Figura 0.18- Grafico di confronto tra l'intensità di pioggia e la frequenza degli eventi con polarità positiva, relativi al 20 ottobre.

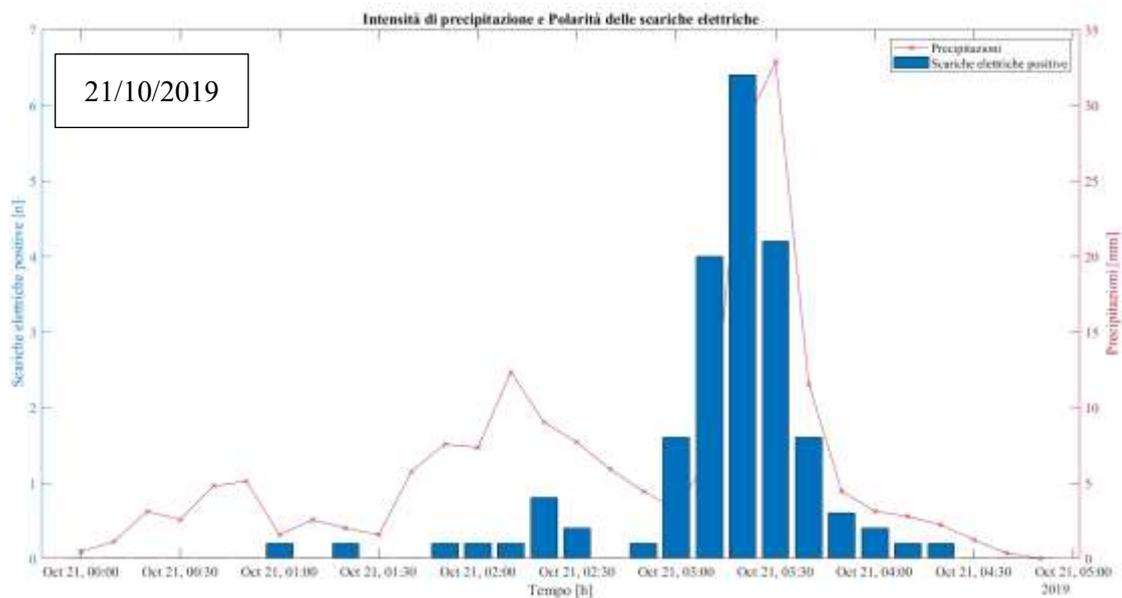


Figura 0.19 - Grafico di confronto tra l'intensità di pioggia e la frequenza degli eventi con polarità positiva, relativi alla mattina del 21 ottobre.

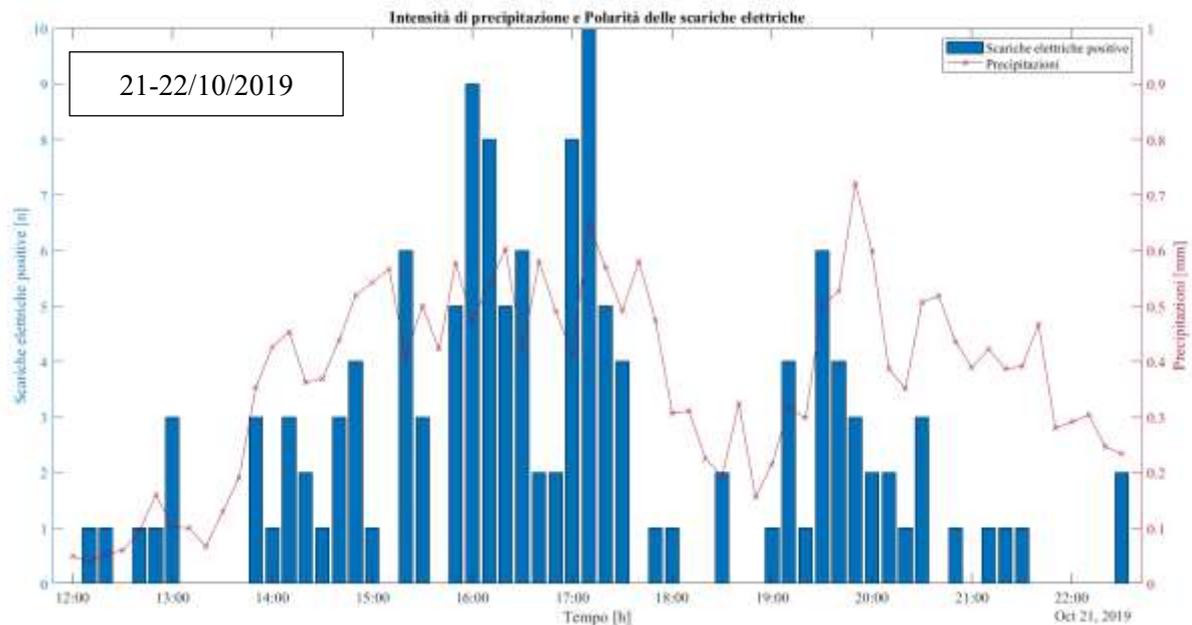


Figura 0.20 - Grafico di confronto tra l'intensità di pioggia e la frequenza degli eventi con polarità positiva, relativi alla sera del 21 ottobre.

Relazione quantitativa tra precipitazioni e scariche elettriche e definizione del parametro Rain-Lightning- Ratio (RLR)

In relazione al fenomeno delle fulminazioni, numerosi autori, individuando una dipendenza tra l'intensità delle precipitazioni convettive e la frequenza dell'attività dei fulmini, hanno cercato di quantificarla identificando un parametro ("RLR - *Rain Lightning Ratio*"), che mettesse in relazione le quantità d'acqua precipitate (solitamente espressa in metri cubi o chilogrammi) per ogni scarica elettrica registrata. La definizione di questo coefficiente, non è fine a sé stessa, ma il motivo dell'interesse della comunità scientifica è stata la volontà di introdurre una nuova metodologia, che potesse condurre ad una stima dei volumi delle precipitazioni, a partire dalle osservazioni dei fulmini (solitamente nube-suolo).

In questo studio, in relazione ai *dataset* disponibili, si è cercato di valutare questa relazione quantitativa, che intercorre tra precipitazioni e fulminazioni, in corrispondenza dell'area d'interesse. Per la definizione del parametro RLR, è stata effettuata una ricerca bibliografica per comprendere quale fosse la metodologia adottata dagli autori, che si sono focalizzati su questa problematica in passato. Ma dall'analisi è emerso che, sulle modalità di determinazione, non vi è un accordo della comunità scientifica, infatti, non è stata identificata una metodologia univoca per la determinazione di questo valore: le scale temporali e spaziali variano notevolmente di studio in studio, Tabella VI.6.



Tabella VI.6 - Riassunto dell'analisi bibliografica sulla metodologia di definizione del fattore RLR.

Analisi Bibliografica: Metodologie per la Definizione del Fattore RLR		
Pubblicazione	Area	Intervallo Temporale
Battan (1965)	1000 km ²	Quattro stagioni estive
Tapia et al. (1998)	2x10 ⁵ km ²	Durata di ogni evento (22)
Soula&Chauzy (2001)	10 ⁵ km ²	Durata di ogni evento (3)
Soriano et al. (2001)	100 km ²	Un mese
Gunfle&Kridler (2006)	450 km ²	Durata di ogni evento (9)
Pieprgrass et al. (1982)	250 km ²	Durata di ogni evento (2)
Petersen&Rutledge (1998)	10 ⁵ km ²	Un mese

Si è, dunque, scelto di procedere con la valutazione della relazione quantitativa pioggia-fulmini, considerando l'area, precedentemente identificata, la cui estensione è pari a 900 km² (30 km x 30 km). Mentre, da un punto di vista temporale, si è scelto di considerare come intervallo l'intera durata del singolo fenomeno temporalesco, dalla fase di maturazione a quella di dissipazione. In letteratura, infatti, per la definizione di questo intervallo di inizio e di fine evento, sono presenti opinioni discordanti: alcuni autori considerano l'istante iniziale e finale basandosi sulla sola osservazione delle fulminazioni (esempio Pieprgrass et al., 1982), mentre altri si basano sull'evoluzione dell'intero evento di pioggia (esempio Kinzer, 1974).

In questo caso, si è proceduto considerando la scala di evento dal punto di vista delle precipitazioni, ottenendo quindi un maggiore intervallo di osservazioni. Infatti, se si considera la durata relativa alle fulminazioni, si avrebbero a disposizione un minor numero di dati disponibili, in quanto le fulminazioni, solitamente, sono presenti in un intervallo temporale molto ristretto, nel quale si verifica la massima intensità della pioggia, all'incirca nella fase di picco dell'evento. Una volta definiti quali siano gli "estremi" dell'intervallo temporale da considerare, si sono calcolati i metri cubi di pioggia e il numero totale delle fulminazioni per ogni episodio temporalesco, al fine di definire fattore RLR "ottimale".

In seguito, si procede con la descrizione della preceduta per la definizione del fattore RLR. Inizialmente, per ogni evento è stato definito un fattore RLR, considerando (Equazione 6.2):

$$RLR \left[\frac{m^3}{n} \right] = \frac{V_p}{X_{tot}} \quad (\text{Equazione 6.2})$$



Dove:

- V_p è il volume di pioggia precipitata lungo l'area oggetto di studio, ottenuto mediante l'Equazione 6.3:

$$V_p[m^3] = \frac{(\sum_i h_i) * A}{1000} \quad (\text{Equazione 6.3})$$

in cui h_i sono le altezze di pioggia medie identificate per ogni Δt di 10 minuti lungo l'intera durata dell'evento, come valore medio delle altezze registrate dai pluviometri ricadenti nel settore identificato, che risulta avere un'estensione $A=30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$.

- X_{tot} è il numero totale delle fulminazioni, sia a polarità negativa che positiva, registrate dai sistemi di monitoraggio lungo l'estensione dell'area oggetto di studio, $45 \text{ km} \times 45 \text{ km}$.

$$X_{tot} = \sum_i x_i \quad (\text{Equazione 6.4})$$

in cui x_i sono le scariche elettriche ricadenti nei territori d'interesse.

Si riportano i fattori RLR, ottenuti per ogni evento, mediante la procedura identificata in precedenza, Tabella VI.7.

Tabella VI.7 - Fattore RLR per ogni evento convettivo identificato.

Data	Evento	Volumi piogge [m ³]	Scariche elettriche [n]	RLR [m ³ /n]
20/10/2019	Convettivo	4.42E+07	105	4.21E+05
21/10/2019	MSC	3.27E+07	910	3.59E+04
21-22/10/2019	V-Shaped	2.48E+08	1943	1.28E+05

Com'è possibile notare dalla tabella riportata in precedenza, il fattore RLR non ha un valore costante, ma risulta soggetto ad un'elevata variabilità. In particolare, è possibile riscontrare, ciò che è già stato osservato da altri autori (esempio Tapla et al., 1998), ovvero: il coefficiente dipende dall'intensità del temporale, e decresce al crescere dell'intensità dell'evento (in termini di frequenza delle scariche elettriche e intensità delle precipitazioni). Infatti, per l'evento prodotto dal sistema MSC, che è stato caratterizzato da ingenti precipitazioni avvenute in un ristretto intervallo temporale, il rapporto volumi di pioggia-fulminazioni risulta assumere il valore minore. L'elevata variabilità riscontrata, da evento in evento, rende il fattore RLR inadatto a qualsiasi impiego sistematico, quale ad esempio la stima delle precipitazioni.



Qualsiasi previsione o considerazione sarebbe fuorviante, poiché questo varia il proprio valore anche di un ordine di grandezza. Per comprendere il motivo dell'elevata variabilità di questo coefficiente è stato preso in considerazione il fattore "polarità della scarica elettrica". Si riporta in seguito una Tabella VI.8, riassuntiva dei valori che hanno caratterizzato i tre eventi.

Tabella VI.8 - Incidenza delle scariche elettriche positive sulla totalità delle fulminazioni per ogni evento.

Data	Evento	Scariche elettriche Positive [n]	Percentuale fenomeni positivi [%]	RLR [m³/n]
20/10/2019	Convettivo	11	10.48	4.21E+05
21/10/2019	MSC	108	11.87	3.59E+04
21-22/10/2019	V-Shaped	220	11.32	1.28E+05

Considerando il numero delle scariche positive, e la loro percentuale sulla totalità delle fulminazioni registrate per ogni evento, è possibile notare che: per alta incidenza di fenomeni con polarità positiva, si riduce il valore di RLR. Bisogna precisare, però, che nello studio in oggetto si verifica la situazione contraria a quella osservata dagli autori Soula&Chauzy (2001), in cui al crescere delle scariche positive aumenta la quantità d'acqua precipitata.

Valutando il grafico, riportato in Figura 0.21 si evince come il verificarsi di una scarica elettrica con polarità positiva, porti ad una notevole riduzione del rapporto tra metri cubi di precipitazione e numero delle fulminazioni: la retta interpolatrice è caratterizzata da una pendenza negativa. Tale osservazione è giustificata dal fatto che si è osservata una stretta relazione tra verificarsi delle scariche elettriche con polarità e intensi precipitativi intensi: la polarità positiva può essere considerato un fattore "premonitore". E come riportato in precedenza al crescere di severità dei fenomeni temporaleschi, si verifica una diminuzione del fattore RLR.



Confronto: Volumi d'acqua per flash e Percentuale di flash CG positivi

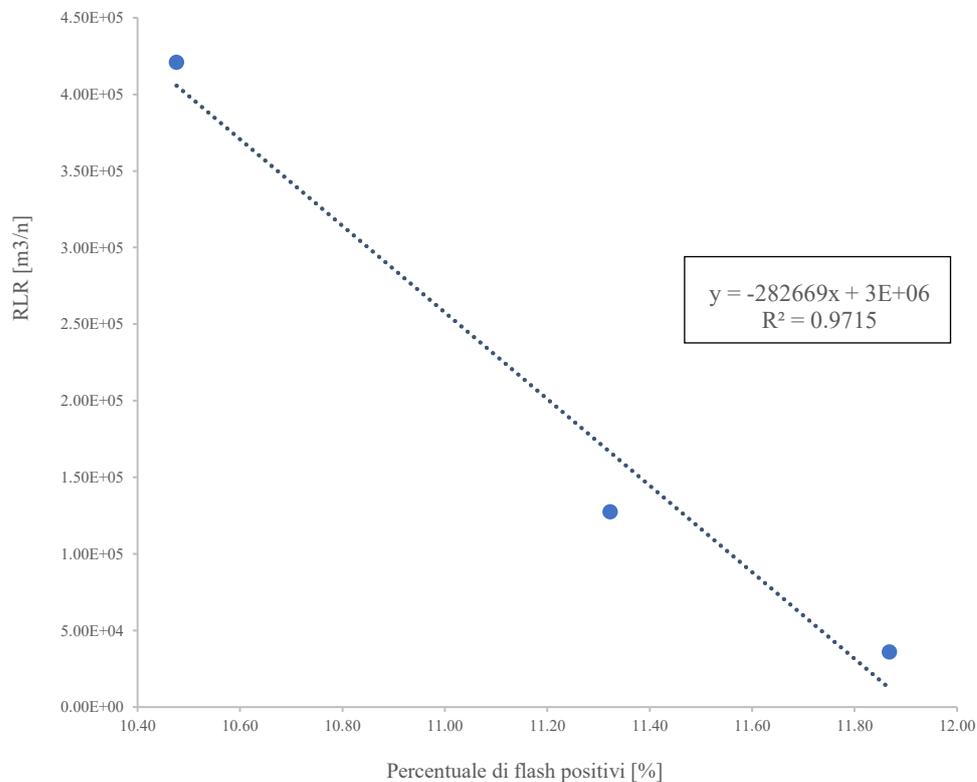


Figura 0.21 - Distribuzione dei volumi d'acqua per scariche elettriche CG in relazione alla percentuale di eventi con polarità positiva, per ognuno dei tre episodi temporaleschi identificati.

Una volta identificata una dipendenza del fattore “segno” delle scariche elettriche, si è proceduto individuando due diversi valori del coefficiente: uno per le fulminazioni caratterizzate da fenomeni elettrici con polarità positiva ed uno per i fenomeni con polarità negativa, come già suggerito da Soula&Chauzy (2001).

Si è quindi proceduto, quindi, con la definizione di due diversi valori di RLR, in base alla polarità delle scariche elettriche. Non essendo realistica l'adozione di un coefficiente negativo, si sono determinati i due parametri, come segue (Tabella VI.0.2):

- RLR^+ è stato posto pari a zero;
- RLR^- è stato individuato adottando un valore ottenuto mediante una media dei valori registrati nei tre diversi eventi, pesata numero delle scariche registrate:



Tabella VI.9 - Valori di RLR+ e RLR-

RLR^+ [m ³ /n]	0
RLR^- [m ³ /n]	1.22E+05

Impiego del fattore RLR per stimare le piogge

Per comprendere se, effettivamente, l'impiego del fattore può portare a dei risultati compatibili con delle applicazioni di *nowcasting*, una volta individuati questi due valori (RLR^- e RLR^+), assunti uguali per ogni evento convettivo è stato effettuato un confronto tra: i volumi di pioggia stimati a partire dal dato delle scariche elettriche e l'applicazione del fattore RLR, e i volumi che sono stati osservati dalla rete di monitoraggio al suolo, che si verificano con un ritardo pari a 20 minuti, Figura 0.22-23-24-25 e Tabella VI.10. I volumi sono stati stimati mediante l'impiego della relazione riportata in seguito (Equazione 6.5):

$$V_s = \left[\sum_{i=1}^n (x_i RLR^-) + \sum_{j=1}^m (x_j RLR^+) \right] \quad (\text{Equazione 6.5})$$

Dove:

- V_s sono i volumi di pioggia stimati [m³];
- V_p sono i volumi di pioggia osservati [m³];
- RLR^+ è il fattore che rappresenta i volumi di pioggia relativa alla singola scarica elettrica positiva [$\frac{m^3}{n^\circ}$];
- RLR^- è il fattore che rappresenta i volumi di pioggia relativa alla singola scarica elettrica negativa [$\frac{m^3}{n^\circ}$];
- x è il singolo evento relativo all'attività elettrica.
- m è il numero delle scariche elettriche positive;
- n è il numero delle scariche elettriche negative;

Tabella VI.10 - Confronto tra valori di volumi di pioggia osservati e stimati mediante i fattori RLR identificati in precedenza.

Data - Evento	Volumi pioggia Osservati [m ³]	Volumi pioggia Stimati [m ³]
20/10/2019 - Convettivo	4.42E+07	1.15E+07
21/10/2019 - MSC	3.27E+07	9.78E+07
21-22/10/2019 - V-Shaped	2.48E+08	2.10E+08

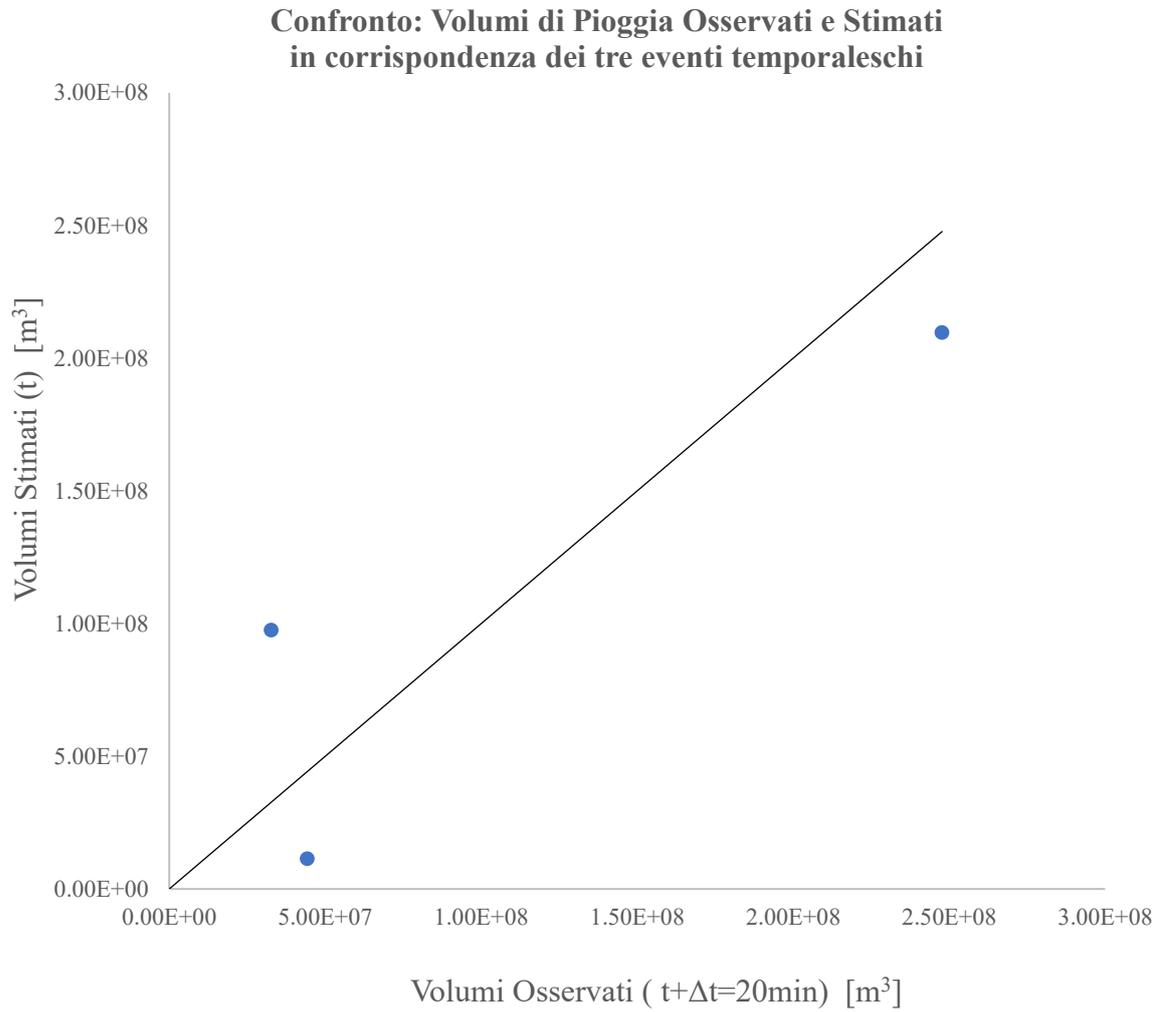


Figura 0.22 - Confronto: Volumi delle precipitazioni osservati e stimati mediante l'adozione di un fattore RLR costante, in corrispondenza dei tre eventi temporaleschi.



Confronto: Metri cubi stimati vs Metri cubi osservati
20/10/2019

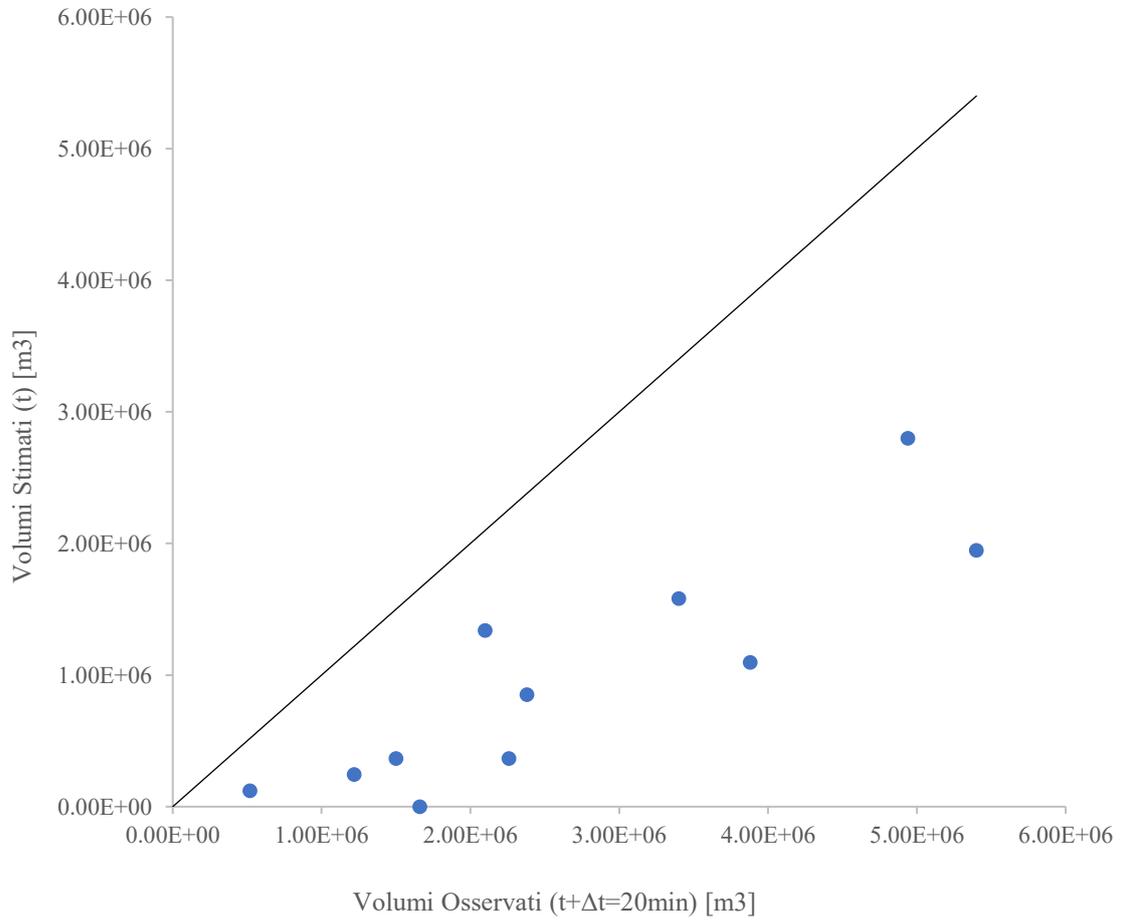


Figura 0.23 - Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20$ min, nell'istante $t_i + \Delta t$.



Confronto: Metri cubi stimati vs Metri cubi osservati
21/10/2019 - Mattina

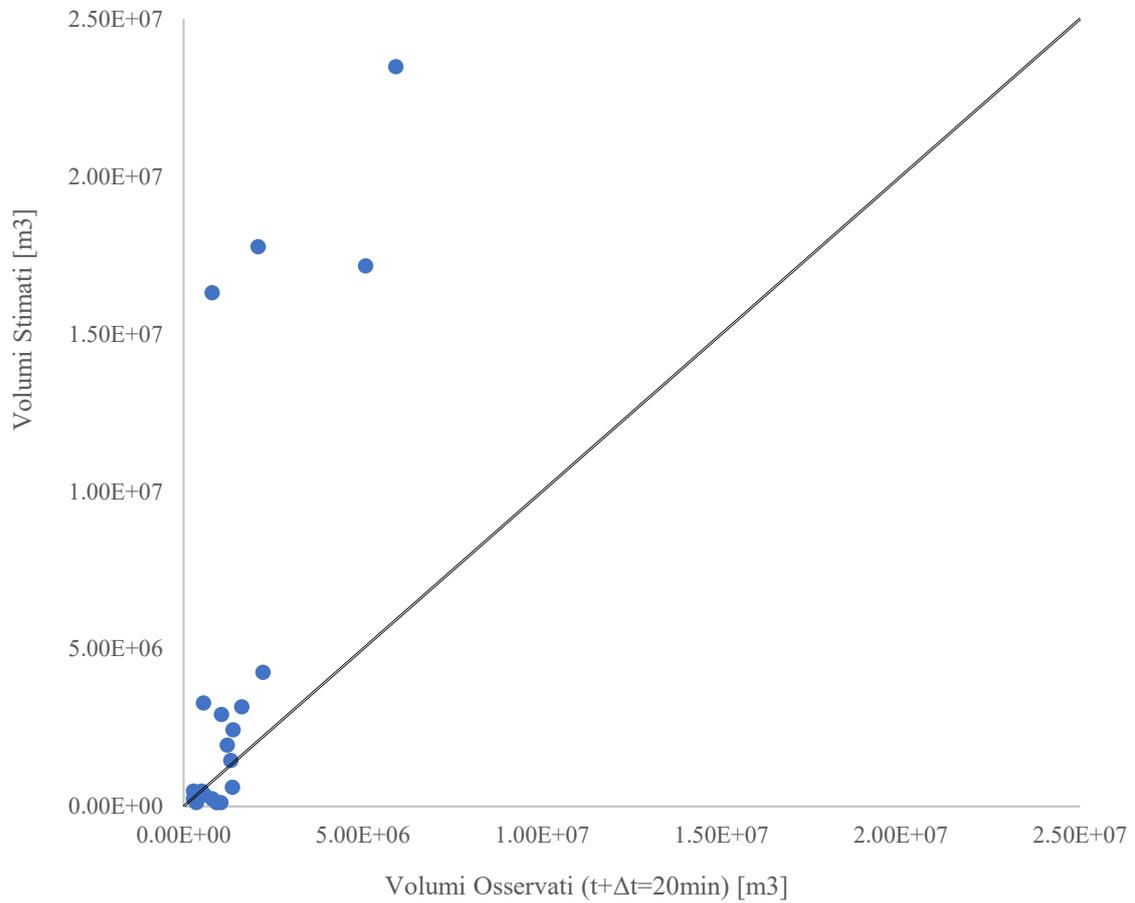


Figura 0.24- Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20$ min, nell'istante $t_{i+\Delta t}$.

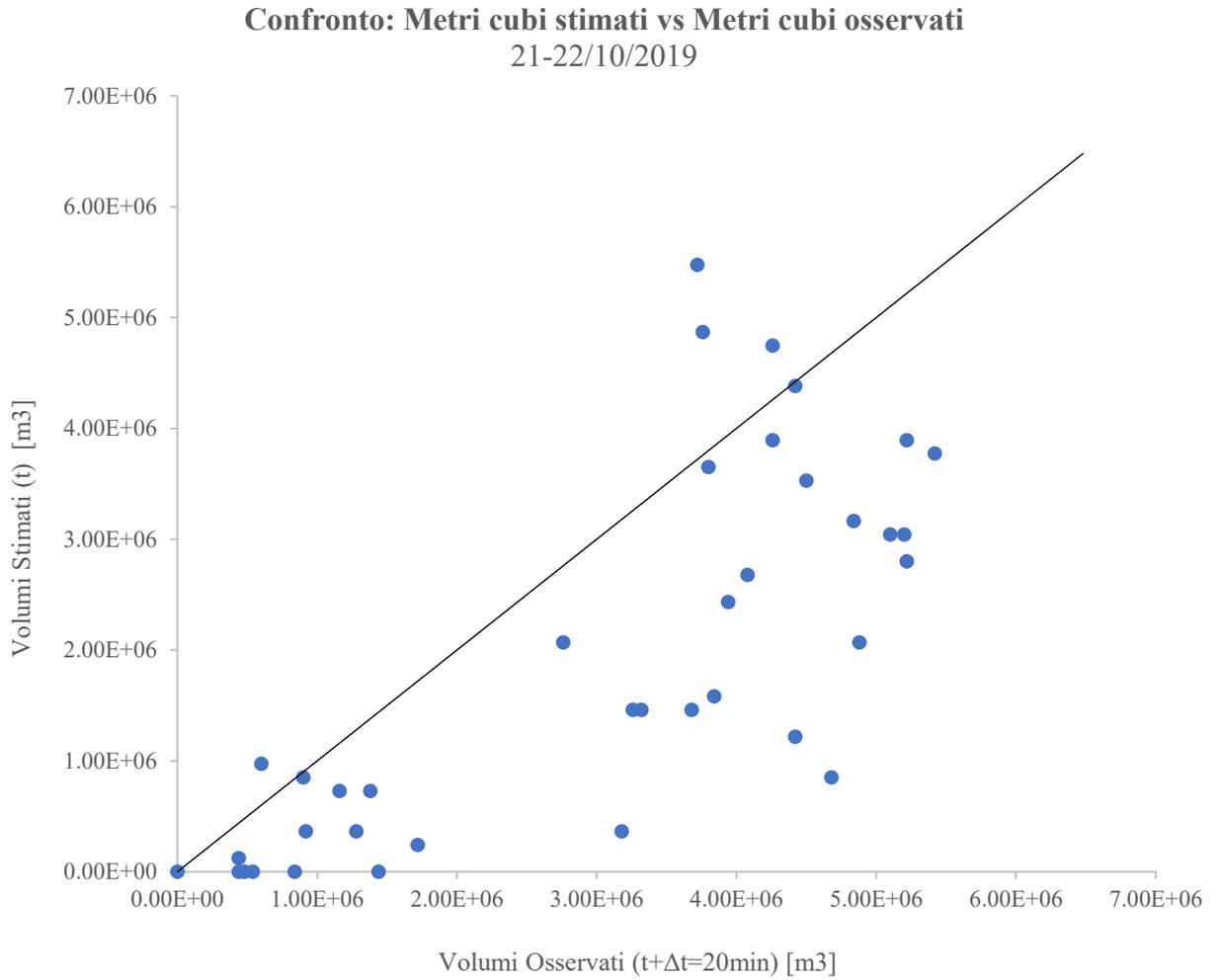


Figura 0.25 - Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20$ min, nell'istante $t_i + \Delta t$.



Ricostruzione della pioggia areale dal dato delle scariche elettriche

Per valutare le potenzialità del dato delle fulminazioni per la stima delle precipitazioni, si è scelto di utilizzare un modello di stima areale simile a quelli proposti da Tapla et al.,(1998) e Soula&Chauzy (2001), in cui per ogni scarica elettrica registrata si associa un valore di altezza di pioggia, derivante dall'applicazione del fattore RLR, omogeneamente distribuito attorno al punto di innesco per un'area di influenza di fissata estensione.

I passaggi per la costruzione delle mappe di distribuzione della pioggia sono stati i seguenti:

1. Identificazione della scariche elettriche, con polarità negativa, registrate dalla rete *Lampinet* ricadenti all'interno dei limiti individuati per l'area d'interesse;
2. Definizione, per ogni punto in cui si è verificata una scarica elettrica, di un'area di influenza, la cui estensione risulta pari a 30 kmx30 km;
3. Attribuzione per ogni area di influenza di un'altezza di pioggia omogeneamente distribuita, il cui valore deriva dai volumi identificati dal fattore RLR rapportati all'estensione dell'intorno di ogni fulminazione.

Dall'applicazione della metodologia, precedentemente descritta, si riportano i campi di pioggia, cumulata su 24 ore, (Figura 0.26-27).

I risultati prodotti, dal punto di vista della distribuzione della precipitazione, permettono di individuare con buona approssimazione le zone soggette alle precipitazioni più intense, ovviamente non sono paragonali a quelli di output delle metodologie di trattazione del dato radar. Infatti, mentre le stazioni radar meteorologiche individuano la posizione e il moto delle particelle d'acqua, identificando in maniera ben definita i nuclei convettivi, il dato delle fulminazioni non è caratterizzato dalla medesima accuratezza. Come riportato in precedenza, la posizione delle fulminazioni non coincide esattamente con la posizione delle celle temporalesca, ma si dispongono sempre in maniera perimetrale. Dunque nella ricostruzione, i massimi di precipitazioni non coincideranno con i punti effettivamente a maggiore riflettività, questi sono soggetti ad una traslazione. Per quanto riguarda, invece, la stima di pioggia, mediante la ricostruzione dei campi di pioggia è possibile osservare che i quantitativi di pioggia risultano sottostimare sia i valori identificati dalla rete di osservazione pluviometrica, in corrispondenza di giorno 20, mentre giorno 21 si osserva una forte sovrastima dettata dal verificarsi di un intensa tempesta di fulmini nelle prime ore del mattino.

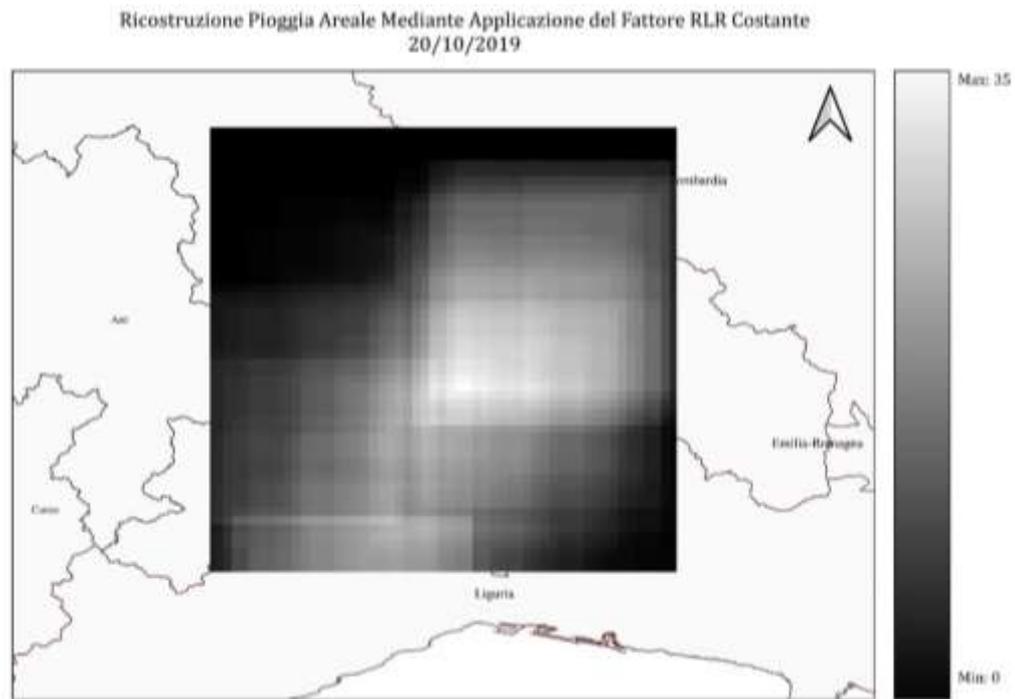


Figura 0.26 - 20/10/2019, Mappa della precipitazione cumulata su 24 ore, stimata mediante l'applicazione di un fattore RLR costante.

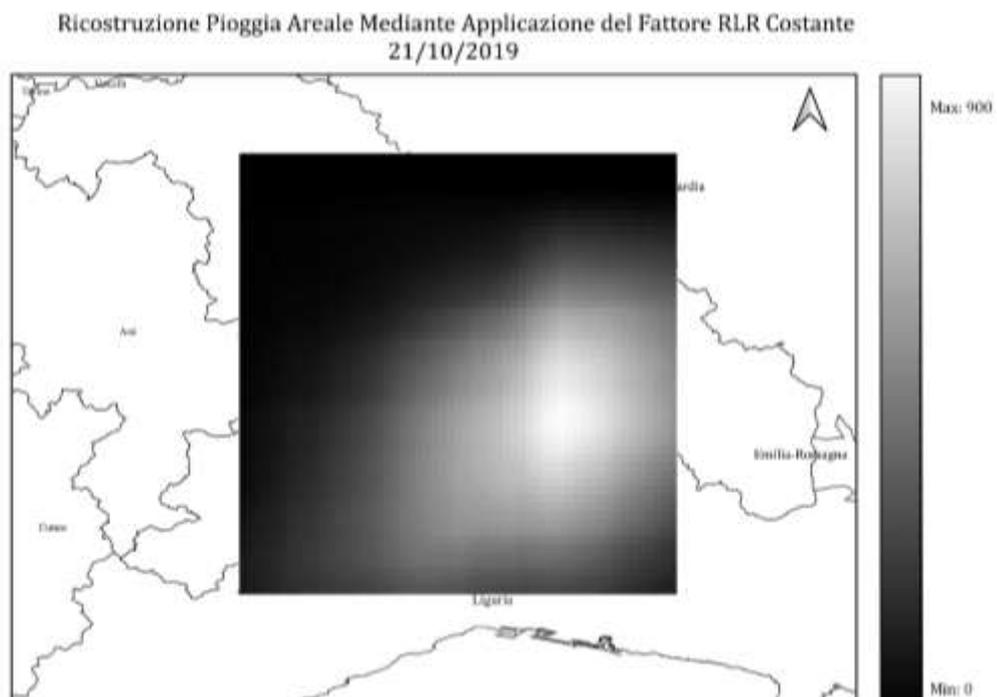


Figura 0.27 – 21-22/10/2019, Mappa della precipitazione cumulata su 24 ore, stimata mediante l'applicazione di un fattore RLR costante.



Limiti della stima della precipitazione mediante l'applicazione del fattore RLR costante

La ricerca dei parametri RLR, di tipo costante, non genera dei risultati che possano essere considerati soddisfacenti per un eventuale uso operativo per la stima delle precipitazioni nel breve termine. L'analisi, descritta nel paragrafo precedente, ha infatti sottolineato l'impossibilità di definire due coefficienti, la cui applicazione permette di produrre delle stime dei volumi di pioggia affidabili, assecondando la variabilità dettata dalla natura degli eventi e dal loro sviluppo nel tempo. Infatti, è possibile osservare che durante i giorni considerati si è verificata una tempesta di fulmini (mattina di giorno 21) il che genera dei valori anomali del fattore RLR, e l'impossibilità di definire a partire dai dati, relativi all'intervallo della tempesta, dei parametri utili per la definizione di valori utili per l'impiego da un punto di vista generale.

La determinazione di questi coefficienti è intrinsecamente dipendente dal *dataset* di dati e condizioni al contorno che vengono impiegati per la sua ricerca. Tale criticità, osservata per le fulminazioni, è analoga a quella che si verifica per la determinazione dei parametri caratteristici delle leggi Z-R a stima fissa per la conversione del dato di riflettività in stima delle altezze di pioggia. Ovvero, non è possibile determinare dei valori costanti ottimali per ogni evento, e durante qualsiasi fase della sua evoluzione. Per evitare di procedere con la definizione di parametri ad hoc per ogni episodio di pioggia o per specifici territori, l'unica metodologia, che permette di bypassare tale criticità, è quella di tipo "adattativo", in cui la calibrazione del parametro RLR avviene in maniera dinamica durante il corso dell'evento, basandosi sull'integrazione dei dati rilevati della rete di monitoraggio delle scariche elettriche con il flusso continuo di dati relativo alle misurazioni effettuate dalla rete di stazioni pluviometriche.

Introduzione della metodologia "adattativa" di calibrazione del parametro RLR

Una volta valutato il limite di una stima mediante parametri fissi, si è deciso di procedere implementando un approccio di tipo "adattativo". Mediante tale metodologia, si vuole identificare un fattore RLR, il cui valore non risulti costante, ma vari lungo l'evoluzione dell'evento di pioggia, sulla base di una calibrazione costante effettuata mediante l'impiego di osservazioni pluviometri, relative ad intervalli temporali antecedenti. La metodologia proposta è semplice e poco onerosa da un punto di vista dell'onere computazionale. In particolare, per ogni intervallo considerato (pari a dieci minuti) viene identificato il parametro RLR sulla base dei volumi di pioggia, registrati dalla rete pluviometrica, e le scariche registrate, sull'area di interesse negli intervalli contemplati dalla finestra temporale mobile.



Per gli step iniziali, si utilizzano per calcolare il parametro i valori disponibili degli intervalli precedenti. Durante il corso dell'evento si incrementano il numero di coppie di dati disponibili, fino a quando gli intervalli rilevati raggiungono una durata pari ad un'ora (sei intervalli da dieci minuti). Una volta ottenuta una finestra di dati antecedenti disponibili di un'ora, la finestra non incrementa più la sua durata ma trasla soltanto nel tempo (Figura 0.28), e si procede con un'operazione di definizione del parametro, il cui valore varia per ogni step temporale, sulla base delle osservazioni relative ai sessanta minuti antecedenti.

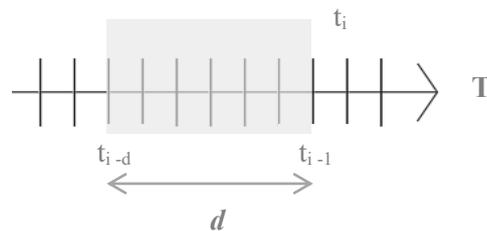


Figura 0.28 – Finestra temporale scorrevole

Per comprendere, se effettivamente l'adozione di una tecnica di calibrazione costante del fattore RLR, comporti un sensibile miglioramento rispetto l'applicazione di un RLR fisso, si è scelto di confrontare sull'intera durata dei tre eventi convettivi, i valori stimati dalla metodologia prima descritta, e i valori di pioggia, che vengono osservati dalle stazioni di monitoraggio, con un tempo di latenza pari a 20 minuti, Figura 0.29-30-21.



Confronto: Metri cubi stimati vs Metri cubi osservati 20/10/19

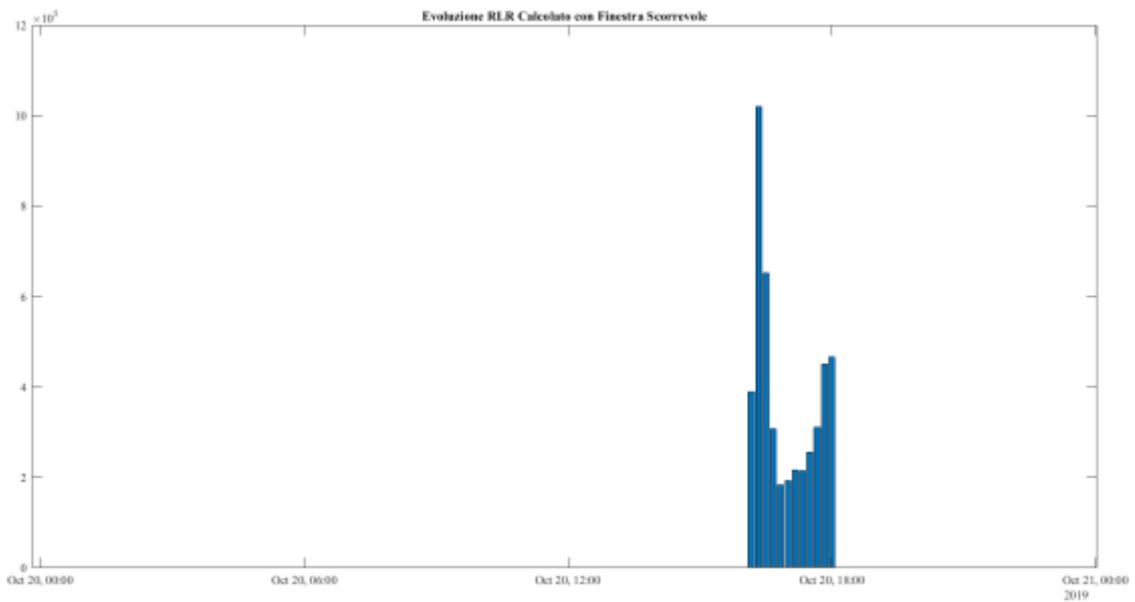
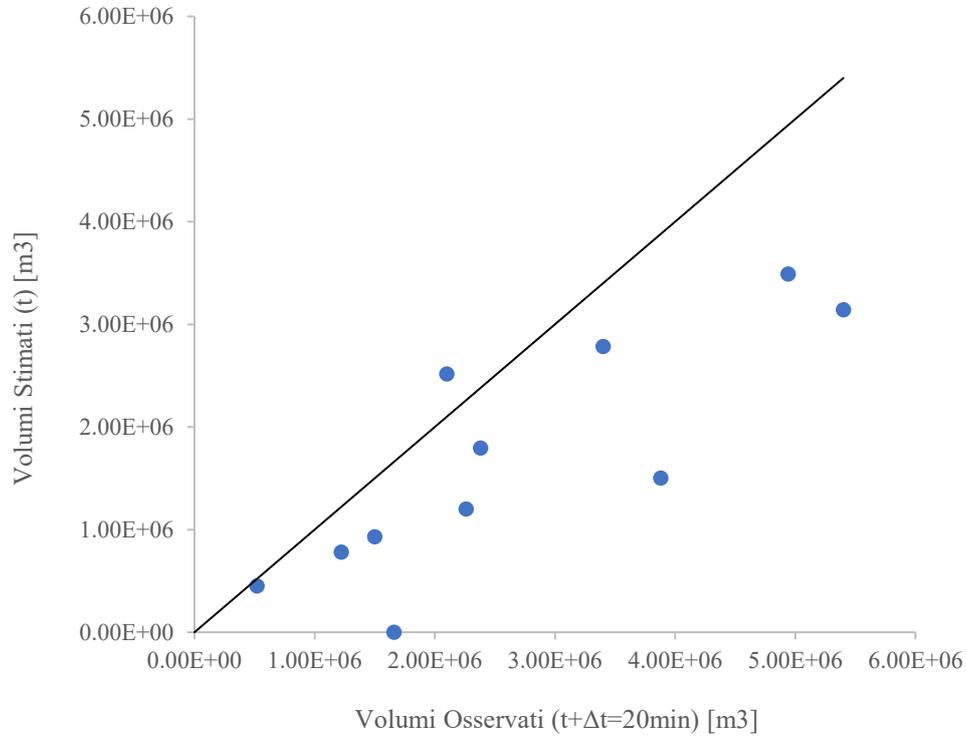


Figura 0.29 - Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20$ min, nell'istante $t_i+\Delta t$, e dettaglio evoluzione del valore del fattore RLR definito con finestra temporale scorrevole.



Confronto: Metri cubi stimati vs Metri cubi osservati
21/10/19 (Mattina)

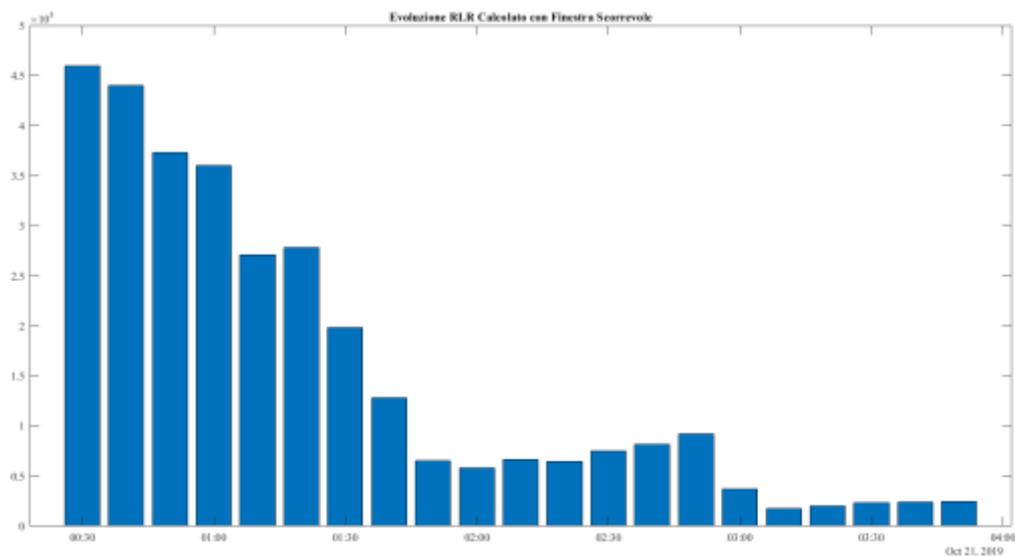
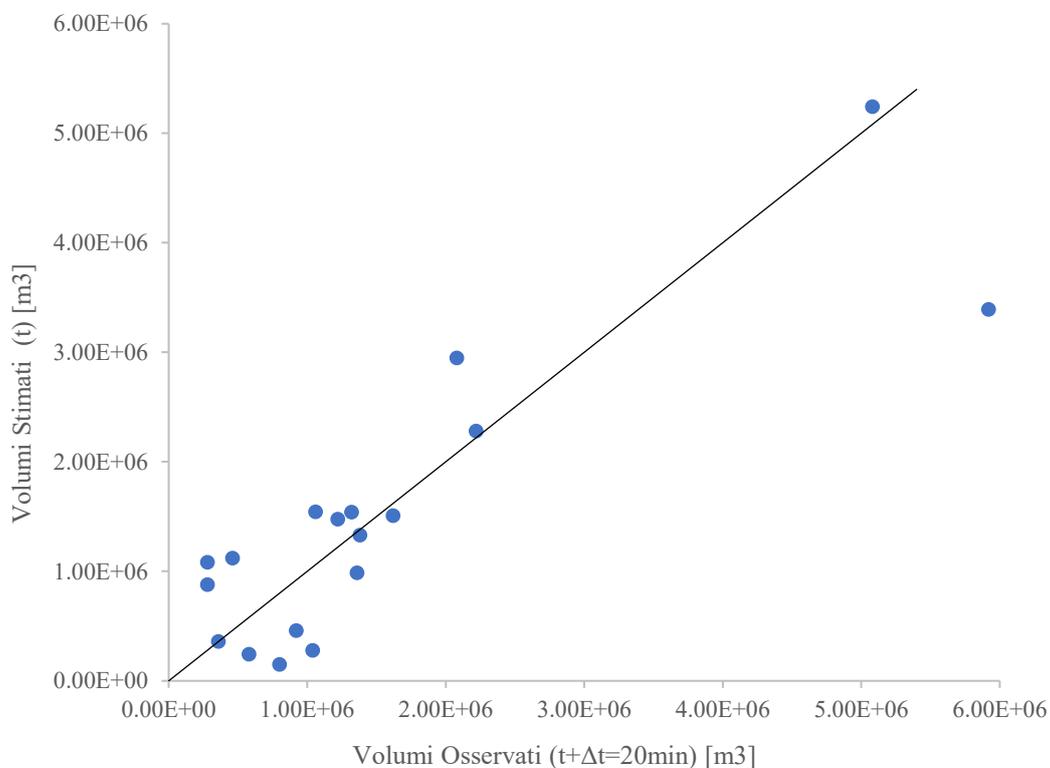


Figura 0.30 - Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20$ min, nell'istante $t_i + \Delta t$, e dettaglio evoluzione del valore del fattore RLR definito con finestra temporale scorrevole.

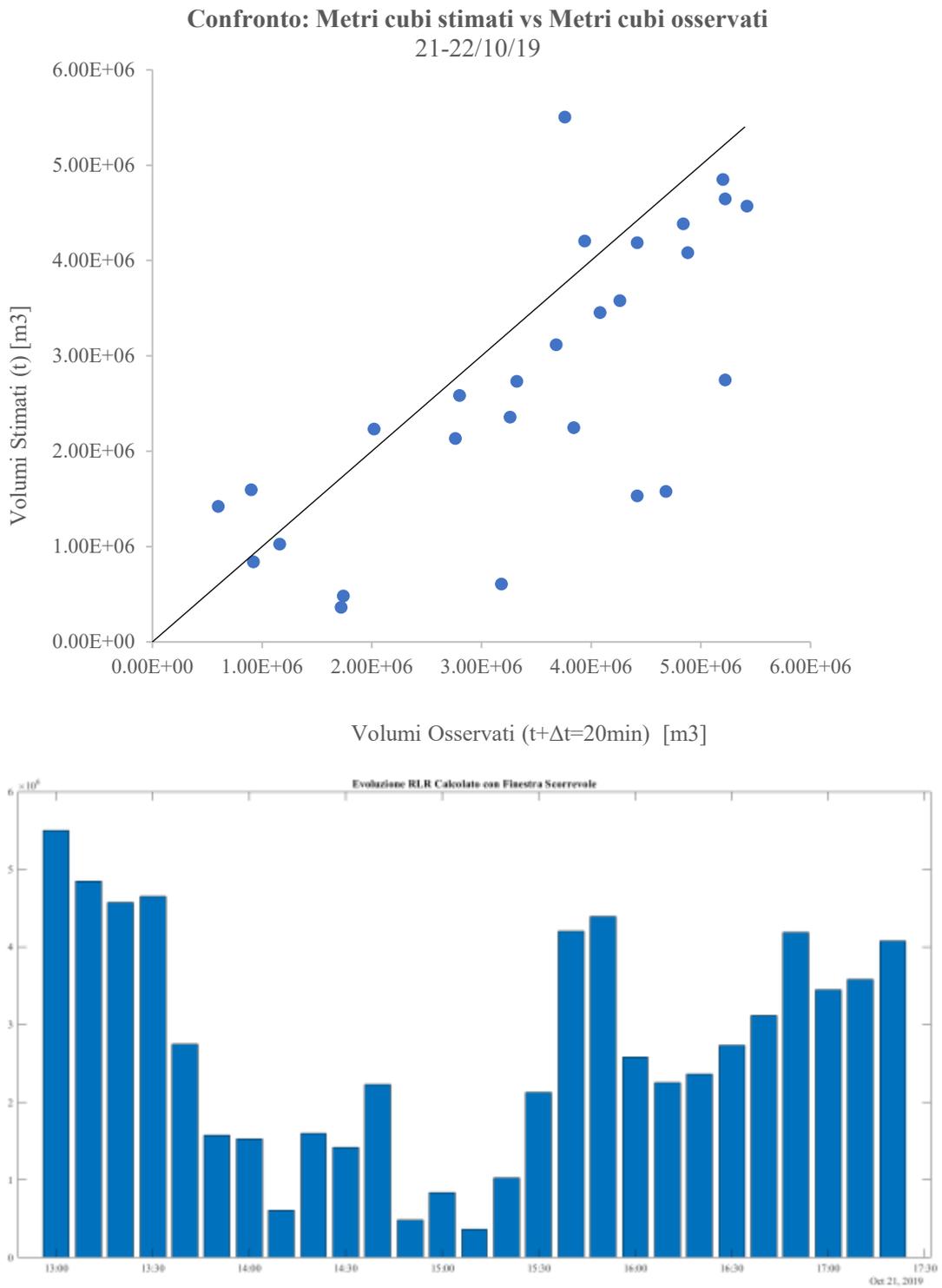


Figura 0.31 - Confronto tra volumi di pioggia stimati all'istante t_i e i volumi osservati dalla rete delle stazioni pluviometriche con un tempo di latenza di $\Delta t=20\text{min}$, nell'istante $t_i + \Delta t$, e dettaglio evoluzione del valore del fattore RLR definito con finestra temporale scorrevole.

Ricostruzione della pioggia areale dal dato delle scariche elettriche

Si riportano di seguito le mappe della pioggia cumulata su 24 ore (Figura VI. 32-33), generate mediante l'adozione di una metodologia "adattativa". L'approccio per la costruzione delle piogge areali è il medesimo impiegato per il caso precedente, RLR costante.

Dai risultati ottenuti, si osserva che anche nel caso di adozione di un fattore RLR dinamico, la posizione dei massimi di pioggia risulta affetta da una traslazione, rispetto alla posizione dei nuclei convettivi, identificata dalle stazioni radar meteorologiche. Mentre, per quanto riguarda, invece, la stima di pioggia, è possibile osservare che i quantitativi di pioggia risultano compatibili rispetto a quelli registrati dalla rete di osservazione pluviometrica per giorno 20, mentre per giorno 21 i massimi ricostruiti dalle fulminazioni risultano affetti da una sovrastima rispetto al radar, che però dalle analisi precedenti è soggetto ad una sottostima, probabilmente causata dalle condizioni orografiche del territorio che ostacolano la propagazione del segnale.

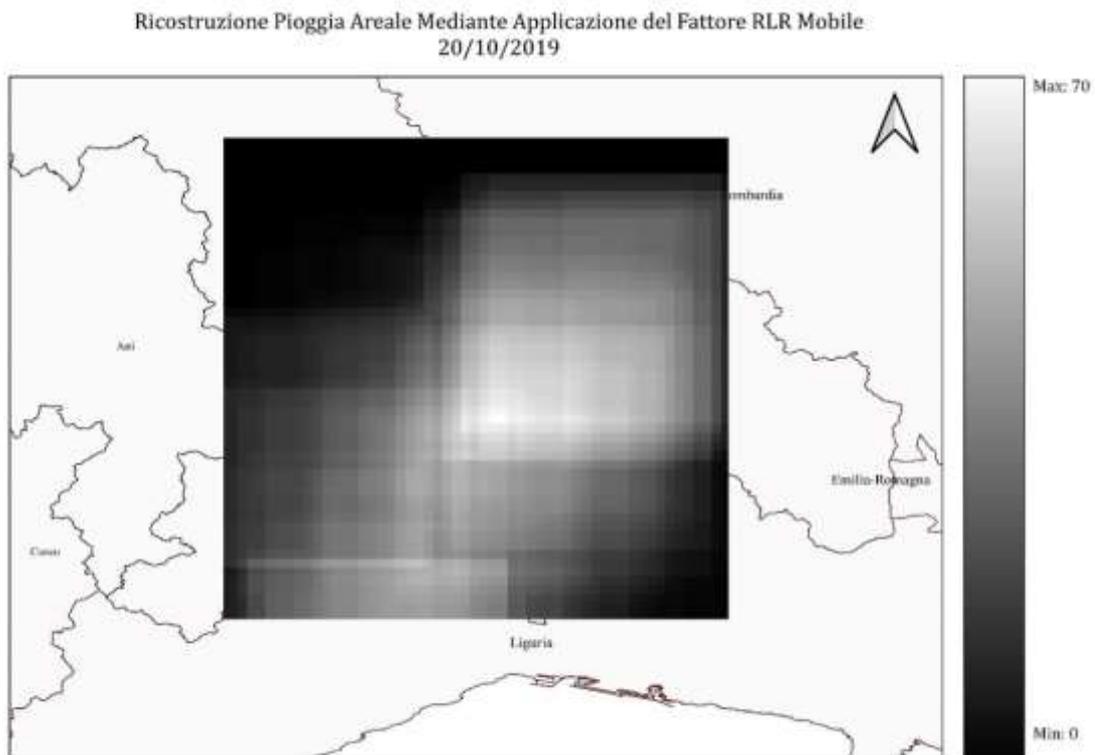


Figura 0.32 – 20//10/2019, Mappa della precipitazione cumulata su 24 ore, stimata mediante l'applicazione di un fattore RLR costante.

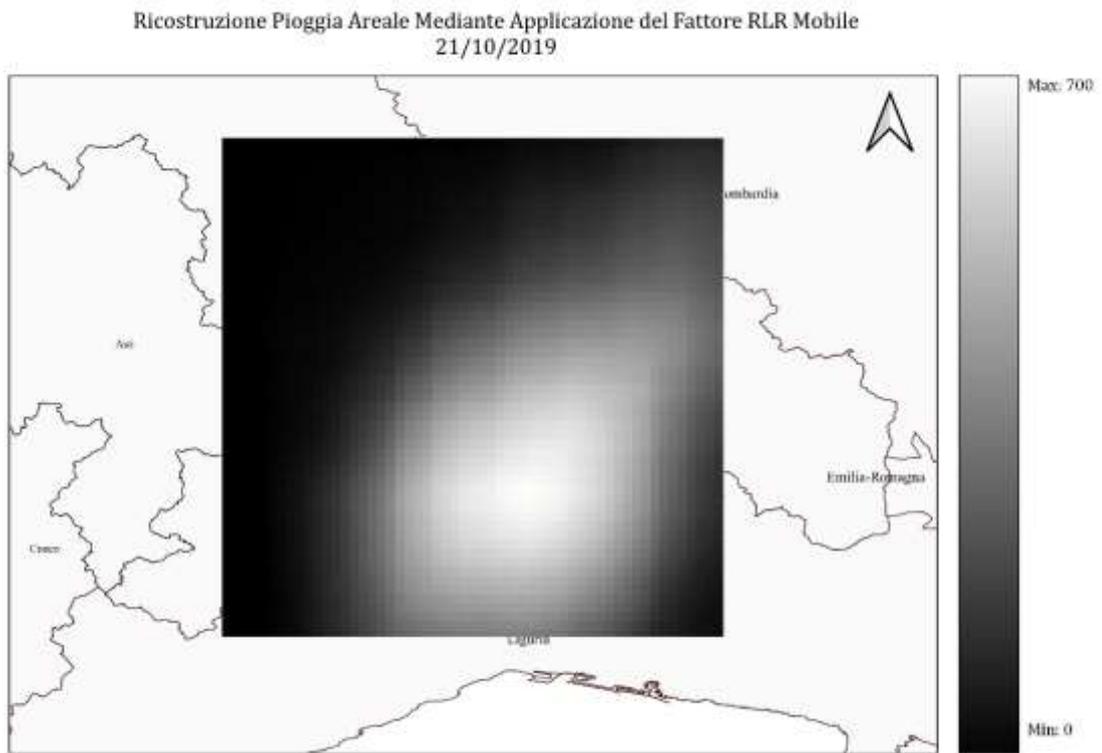


Figura 0.33 – 21-22/10/2019, Mappa della precipitazione cumulata su 24 ore, stimata mediante l'applicazione di un fattore RLR costante.



Conclusioni

In questo lavoro di tesi, partendo dall'analisi e dalla ricostruzione ex post degli eventi di pioggia, che hanno duramente colpito i territori del Piemonte nell'ottobre del 2019, si sono valutati ed esaminati eventuali vantaggi derivanti dall'introduzione di nuovi strumenti di *remote-sensing* e di nuove metodologie di elaborazione dati, a supporto delle attività di previsione di fenomeni di pioggia eccezionale a carattere convettivo.

Gli eventi di pioggia estrema, che si sono verificati durante l'evento in esame, sotto forma di struttura temporalesca organizzata, sono stati innanzitutto valutati mediante le informazioni fornite dallo strumento radar meteorologico. L'informazione prodotta da quest'ultimo è stata elaborata, per ottenere una stima delle altezze di pioggia, mediante un approccio di tipo "adattativo", identificato nella tecnica ATS (2015). La tecnica di stima identificata, proposta in Libertino et al., (2015), permette di effettuare una stima, impiegando dei parametri caratteristici, calibrati sulla base delle misurazioni pluviometriche disponibili, che variano nel tempo e nello spazio, adattandosi in maniera dinamica e assecondando la variabilità e il rapido sviluppo dei fenomeni precipitativi osservati dallo strumento radar. I risultati di questa metodologia, espressi sotto forma di stima delle altezze di pioggia in corrispondenza di ognuna delle stazioni pluviometriche, sono stati validati mediante un confronto con i valori effettivamente osservati. Dall'analisi dei risultati di output, in corrispondenza di ogni punto strumentato, si è osservato che mediante il processo di taratura costante nel tempo e nello spazio dei parametri della legge Z-R, è possibile ottenere dei buoni risultati, affetti da un errore di entità contenuta. Tale errore, è probabilmente imputabile a fonti, che possono affliggere la stima della precipitazione, non direttamente connesse alla procedura di conversione della riflettività in precipitazione, infatti non è trascurabile la complessità orografica le caratteristiche climatiche della regione considerata. Mediante l'adozione di questo approccio di stima adattativo, nonostante non si raggiunga un perfetto adattamento tra le piogge stimate ed osservate, è possibile ottenere dei buoni risultati e dunque superare le criticità derivanti dall'adozione di una legge empirica a stima fissa, che se da una parte permette la stima della precipitazione mediante un discreto onere computazionale, dall'altra è soggetta ad un errore, derivante dall'impiego di parametri caratteristici costanti e non tarati sui territori d'interesse. Infatti, si è osservato che l'implementazione, sui medesimi dataset, di una legge Z-R a parametri fissi (Marshall&Palmer, 1948), genera dei prodotti che risultano soggetti ad una forte sovrastima, che rende questi ultimi incompatibili con delle applicazioni nell'ambito delle attività previsionali.



Una volta valutata la capacità di stima “puntuale” del metodo ATS (2015), si è deciso di precedere con la definizione di una metodologia, che permettesse di procedere con una stima di tipo areale. I dati di output, forniti dal metodo ATS (2015) in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica, sono stati impiegati per la conversione del valore di ogni cella delle mappe di riflettività in stima di pioggia, e dunque per la ricostruzione dei campi della precipitazione. Le mappe prodotte, mediante l’adozione di questa metodologia, restituiscono informazioni con un’elevata risoluzione temporale e spaziale gli eventi a carattere convettivo verificatisi, generando punto per punto stime della precipitazione affette da errori molto contenuti: il che permette di valutare lo sviluppo dei fenomeni con estrema accuratezza. Dall’analisi dei prodotti di output areali, è emerso inoltre che i massimi di riflettività in corrispondenza dei nuclei convettivi hanno in molti casi “schivato” la rete pluviometrica al suolo, incuneandosi nei territori non strumentati. Infatti, sovrapponendo le mappe di pioggia identificate e l’ubicazione delle stazioni ricadenti nell’area di interesse, è possibile notare come per tutti gli episodi temporaleschi, la posizione dei picchi di precipitazione è posta in corrispondenza di territori in cui non sono presenti stazioni di misura, nonostante la rete pluviometrica piemontese sia distribuita in maniera omogenea sul territorio regionale, sottolineando ancora una volta il ruolo cruciale delle osservazioni radar per questa tipologia di evento di pioggia.

Inoltre, si è valutata l’introduzione nei processi previsionali di un ulteriore fattore, identificato nelle fulminazioni. La scelta di questo parametro è stata influenzata dal fatto che, questa viene monitorata quotidianamente dalla rete di rilevamento *Lampinet* dell’Aeronautica Militare Italiana, ma non viene ancora sfruttata nell’ambito della protezione civile. Sì, è dunque, ipotizzato un suo possibile inserimento nei processi di fusione di dati a supporto della formulazione di previsioni a breve e brevissimo termine di precipitazioni estreme, a carattere convettivo. Tale parametro non è strettamente connesso al fenomeno di pioggia, ma ad un processo (elettrificazione delle nubi) ad esso correlato. In ogni caso tale informazione, risulta aggiuntiva e permette di supplire alle limitazioni e alle criticità della copertura radar, ad esempio in caso di problemi orografici, o dove questa risulta totalmente assente (isole minori, Mar Mediterraneo). I risultati ottenuti dall’analisi della correlazione piogge-fulminazioni, sulla base dei dati relativi al caso studio, e le modalità di trattazione identificate dall’analisi bibliografica, possono essere considerati soddisfacenti. Infatti, l’osservazione delle scariche elettriche fornisce informazioni, con un breve anticipo, e la posizione dei nuclei convettivi, e permette quindi di ottenere maggiori informazioni relativamente alle traiettorie successive.

Per quanto riguarda il rilevamento dei processi di elettrificazione delle nubi, così come l’osservazione del dato di riflettività delle idrometeore, non genera una misura diretta dell’altezza



di pioggia, ma grazie al monitoraggio di questi, è possibile ottenerne una stima. Si è quindi ricercata una metodologia che permetta di ottenere una stima dei valori di precipitazione attesi, partendo dall'analisi delle fulminazioni, avvenute in un intervallo temporale precedente. Una volta osservate le criticità e le limitazioni delle metodologie proposte in letteratura, in analogia a quanto accade con la trattazione dei dati radar con le leggi Z-R, si è deciso di procedere con la definizione di un'ulteriore metodologia basata sull'adozione del parametro caratteristico RLR, mediante l'adozione di una finestra di media mobile di tipo "scorrevole". La stima prodotta non risulta esente da errori, ma fornisce informazioni sull'entità delle precipitazioni con breve anticipo. Inoltre, coniugando il fattore RLR con l'ubicazione dei punti d'innesco delle scariche elettriche è possibile effettuare una ricostruzione delle piogge areali, seppur in modo meno preciso rispetto all'informazione radar, da cui è possibile dedurre le aree soggette alle precipitazioni più violente e una stima delle stesse.

I prodotti generati dalle reti di rilevamento delle fulminazioni possono essere considerati quindi decisamente promettenti, in quanto introducono diversi elementi utili alla valutazione dell'intensità di pioggia mediante un ulteriore strumento osservativo rispetto quelli più comunemente utilizzati.



ALLEGATO I - Il Radar Meteorologico

Evoluzione e Sviluppo Tecnologico del Radar Meteorologico

Il *RADAR* (acronimo di “*Radio Detecting and Ranging*”, in italiano “Radiorilevamento e misurazione di distanza”), è uno strumento di *remote-sensing*, il quale mediante un apparato che trasmette e riceve onde elettromagnetiche, permette di osservare da un unico punto di misura, quello relativo alla stazione, un’estesa regione di atmosfera e valutare una serie di parametri connessi ad oggetti, o fenomeni atmosferici, senza che vi sia con questi ultimi un “contatto” diretto (Figura A1.1)



Figura A1.1 - Radar meteorologico sito sulla sommità di Monte Lema, in Svizzera.

L’utilizzo dei primi sistemi radar risale agli anni Quaranta, tale strumento nasce, infatti, per scopi militari durante la Seconda Guerra Mondiale, per il rilevamento e la determinazione della posizione (distanza, altezza e azimut), ed eventualmente della velocità di oggetti, sia fissi che mobili, come: aerei, navi, ed altri veicoli. Dopo poco tempo, a partire dagli anni Cinquanta, vengono colte dalla comunità scientifica le sue numerose potenzialità e i possibili campi di applicazione, tra cui la sorveglianza meteorologica.



Infatti, con il passare degli anni, si cominciò a pensare che, mediante questo strumento, si potessero investigare *target* di natura differente, come quelli di tipo “diffuso” associati a fenomeni atmosferici, come le precipitazioni, che nelle prime applicazioni belliche erano considerate soltanto e un fattore di “disturbo”, il quale generava un’alterazione nella propagazione del segnale.

Le potenzialità e le caratteristiche prestazionali dei radar meteorologici di *prima generazione* erano però molto scarse, in quanto permettevano di effettuare soltanto osservazioni di natura qualitativa dei fenomeni monitorati. Infatti, fino ai primi anni Settanta lo strumento identificava unicamente la potenza media dell’eco ricevuto, e da quest’unico parametro, venivano estratte tutte le informazioni relative ai fenomeni atmosferici osservati. Rispetto ad allora, i sistemi radar hanno subito un enorme progresso tecnologico, si è, infatti, passati da un’informazione di tipo qualitativo ad una di tipo quantitativo, in relazione alla rilevazione delle idrometeore. Oggi, sono comunemente utilizzati i radar di *seconda generazione*, caratterizzati rispetto alle strumentazioni antecedenti, da notevoli migliorie da un punto di vista prestazionale, tra cui: il funzionamento mediante range di frequenza delle microonde (bande C, S ed X), e l’introduzione di sistemi Doppler, che permettono di identificare la velocità radiale dei bersagli. Per quanto riguarda il campo della ricerca, sono già presenti ed in uso strumenti detti di *terza generazione (o multi-parametrici)*, in grado di misurare contemporaneamente più fattori, coniugando, in un unico elemento, le potenzialità dei radar Doppler e i radar polarimetrici, e il cui utilizzo consente di ottenere informazioni inerenti alla microfisica delle precipitazioni (forma, dimensione e orientamento delle particelle d’acqua).

L’interesse della comunità scientifica, nei confronti di questa tecnologia, ha quindi determinato un repentino sviluppo tecnologico dello strumento radar. Oggi, infatti, è possibile ottenere numerosi vantaggi dal suo impiego, ad esempio:

- Un’estesa copertura da un punto di vista territoriale, ed un’elevata frequenza di scansionamento, che permettono il rilevamento dei fenomeni atmosferici in atto, in tempo reale e con continuità spaziale;
- Il monitoraggio in tempo reale dei fenomeni di precipitazione, in termini di intensità e tipologia, caratterizzando da un punto di vista microfisico le particelle presenti in atmosfera, attraverso sistemi a doppia polarizzazione;
- Il monitoraggio e la previsione a breve termine dei fenomeni precipitativi, in termini di direzione, velocità ed evoluzione;

- La complementarità con altri strumenti di osservazione, per rendere più accurate le stime delle precipitazioni, integrando i dati della rete radar con quelli della rete di monitoraggio al suolo e delle osservazioni satellitari.

Il funzionamento del Radar Meteorologico

Il radar meteorologico è uno strumento di osservazione delle idrometeore, classificabile come di *telerilevamento "attivo"*, poiché genera esso stesso un segnale e successivamente ne capta la radiazione di ritorno. Infatti, per un certo periodo (τ) il radar trasmette il segnale, e, successivamente, per un altro periodo (T_s) riceve il segnale di ritorno (Figura A1.2). La frequenza, con cui si ripete un ciclo di trasmissione e ricezione, è detta *Pulse Repetition Frequency (PRF)* - numero di impulsi radar al secondo). Il dato acquisito dal radar meteorologico è, dunque, relativo all'energia del fascio elettromagnetico di ritorno, che una volta intercettato un obiettivo meteorologico di tipo "diffuso" (Figura A1.3), viene ricevuto dall'apparato ricevente dello strumento, portando con sé informazioni sull'eventuale presenza di idrometeore in atmosfera, di natura qualitativa e quantitativa.

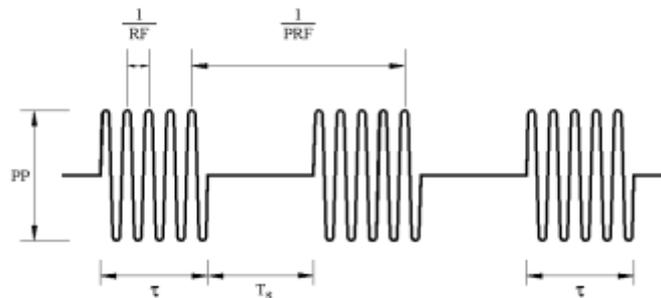


Figura A1.2 - Struttura degli impulsi delle onde elettromagnetiche emesse dal radar: PRF = frequenza di ripetizione degli impulsi; τ = larghezza dell'impulso trasmesso; RF = Radiofrequenza; T_s = Tempo di ascolto.

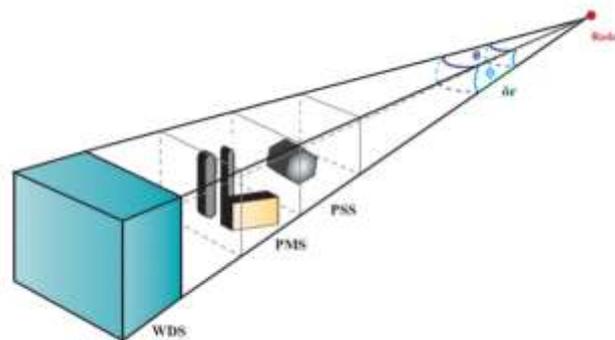


Figura A1.3 - Tipologie di target: PSS (Permanent single scatterers), PMS (Permanent multiple scatterers) e WDS (Weather distributed scatterers).



In maniera semplificativa, il principio di funzionamento del radar meteorologico può essere schematizzato in tre differenti step successivi: emanazione, da parte del trasmettitore del segnale, intercettazione dell'idrometeora e captazione del segnale di ritorno, da parte dell'apparato ricevente. Inizialmente, il radar genera un'onda elettromagnetica (fascio radar), sotto forma di impulsi, che viene focalizzata da un'antenna e trasmessa nell'atmosfera. Il segnale, dunque, si propaga in atmosfera lungo la direzione di puntamento dell'antenna scelta, che è possibile definire mediante: l'angolo che il fascio radar intercetta con il nord geografico (azimut), e l'angolo che il fascio forma con il piano orizzontale (angolo di elevazione).

Nella fase di trasmissione dell'onda elettromagnetica due fattori sono quelli caratterizzanti:

- La durata dell'impulso trasmesso τ , da cui è possibile definire la risoluzione spaziale dello strumento (Equazione A1.1).

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \quad (\text{Equazione A1.1})$$

in cui c la costante relativa alla velocità della luce, e τ la durata dell'impulso trasmesso.

- La frequenza del segnale (T), da cui deriva la capacità di rilevare idrometeore di diversa natura, l'ingerenza dell'attenuazione del segnale durante la fase di propagazione e la portata del radar, espressa come segue (Equazione A1.2):

$$r_{max} = \frac{c}{2PRF} \quad (\text{Equazione A1.2})$$

in cui c la costante relativa alla velocità della luce e PRF è la frequenza di trasmissione e ricezione.

Le onde propagandosi in atmosfera, intercettano le idrometeore eventualmente presenti lungo la direzione di puntamento, che in parte assorbono l'energia, e in parte la riflettono in tutte le direzioni nell'ambiente circostante, tra cui la direzione dell'antenna radar. Questo segnale di ritorno (eco radar), prodotto dai bersagli colpiti, si propaga in direzione dell'antenna, e viene successivamente analizzato dall'apparato ricevente, ottenendo informazioni sui bersagli, come: posizione, dimensione, tipologia di idrometeora, intensità, e velocità radiale.

L'Informazione Radar

I radar meteorologici effettuano delle scansioni e forniscono misurazioni, le quali consentono di indagare gli eventi atmosferici in atto, che ricadono in un volume a tre dimensioni, mediante una scansione di tipo volumetrico (superfici coniche corrispondenti a predeterminate elevazioni) ad intervalli di tempo prefissato. La scansione avviene facendo variare ϕ l'angolo di azimut, e θ l'angolo di elevazione, Figura A1.4.

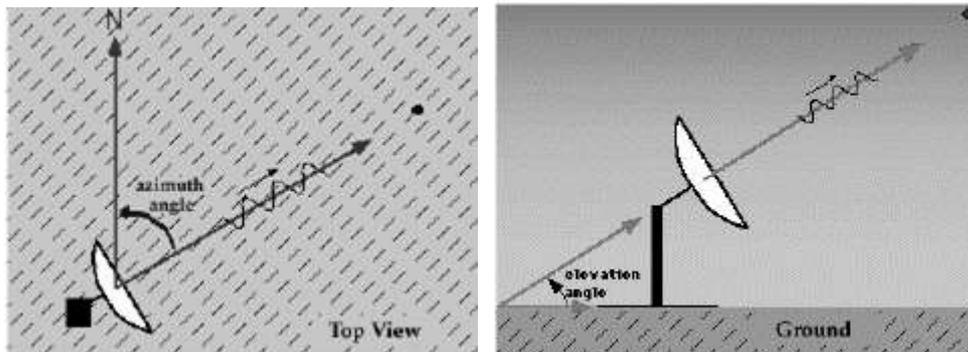


Figura A1.4 - Rappresentazione dell'angolo di azimut e dell'angolo di elevazione del fascio radar.

Per ogni punto, intercettato alla scansione, determinato tramite una terna di valori di coordinate sferiche (r , distanza antenna-bersaglio, φ , angolo di azimut, ϑ , angolo di elevazione), vengono effettuate delle misurazioni, fornite poi sotto forma di dato di:

- **Riflettività (Z)**

Il radar meteorologico riceve l'eco di ritorno, e analizza la potenza dell'impulso elettromagnetico ricevuto (P_r), il quale risulta direttamente connesso alla potenza del segnale trasmesso, alle proprietà del bersaglio (le diverse idrometeore presentano riflettività differenti), alle caratteristiche dell'antenna, e alla distanza radar-bersaglio.

Tale relazione, tra la potenza del segnale retrodiffuso e i fattori precedentemente enunciati, trova espressione nell'equazione fondamentale della radar meteorologia per un segnale distribuito (Equazione A1.3).

$$P_r = \frac{C \cdot k^2 \cdot \Sigma D^6}{r^2} \quad (\text{Equazione A1.3})$$

In cui:

- C è la costante radar, che tiene conto delle caratteristiche fisiche del sistema;
- k è la costante dielettrica;
- D è il diametro delle gocce.

Sostituendo a ΣD^6 la riflettività radar (Z), si ottiene la seguente (Equazione A1.4):

$$P_r = \frac{CKZ}{r^2} \quad (\text{Equazione A1.4})$$

Dove:

- P_r è la potenza media ricevuta dal bersaglio meteo;
- C e K sono le costanti radar;
- Z è la riflettività;
- r è la distanza del bersaglio meteo dal radar.



In generale, l'informazione, derivante dall'eco radar, viene espressa in termini di riflettività Z , che viene successivamente ricondotta in intensità di precipitazione, mediante l'applicazione di leggi empiriche di tipo Z-R.

- **Riflettività differenziale (Z_{DR})**

I sistemi a doppia polarizzazione o radar polarimetrici, permettono la valutazione della riflettività dei bersagli meteorologici secondo due diversi piani reciprocamente ortogonali. Il funzionamento di questi strumenti, si basa sulla trasmissione, alternata, di impulsi polarizzati, orizzontalmente e verticalmente. Il sistema facendo vibrare il campo elettromagnetico lungo un piano orizzontale e verticale, genera un'eco di ritorno del segnale, che dipende dalle caratteristiche geometriche del bersaglio posto lungo la direzione del piano di polarizzazione. Tale tipologia di radar permette, dunque, di ottenere maggiori informazioni, rendendo possibile una distinzione tra echi "meteorologici" e "non meteorologici", e consentendo di ricavare informazioni più dettagliate sul bersaglio, tramite il riconoscimento della forma, grandezza e contenuto delle idrometeore, l'identificazione del tipo di precipitazione. La riflettività differenziale (Z_{dr}), fornisce, quindi, un fattore di forma delle particelle, contenute nella cella radar, ed è pari (Equazione A1.5):

$$Z_{dr} = 10 \log_{10} \frac{Z_h}{Z_v} \quad (\text{Equazione A1.5})$$

In cui:

- Z_H è la riflettività di un'onda polarizzata orizzontalmente;
- Z_V è la riflettività di un'onda polarizzata verticalmente.

- **Velocità radiale V**

Il radar Doppler, sfruttando l'effetto omonimo, è in grado di misurare la velocità radiale, ossia la componente radiale della velocità del bersaglio nella direzione intercettata del radar. La misura dell'effetto Doppler consiste, dunque, nell'analisi della variazione di fase del segnale ricevuto rispetto a quello emesso. Misurando la differenza di fase tra i due impulsi successivi, è possibile ricavare una stima dello spostamento dell'idrometeora rispetto al radar. Conoscendo la variazione di fase, la lunghezza d'onda e l'intervallo di tempo trascorso, si può calcolare la velocità di spostamento (avvicinamento o allontanamento) del bersaglio osservato, in relazione alla posizione del radar. La misura radar non è però puntuale ed assoluta, ma all'interno del volume di scansione sono presenti numerose idrometeore, che si muovono con velocità differenti, quindi al sistema radar non arriverà solamente una velocità Doppler, bensì una distribuzione.



In generale si considera come parametro, il valore medio della distribuzione, che rappresenta la velocità media delle idrometeorie presenti nel volume.

Errori Radar nella Stima del Campo delle Precipitazioni

Le misurazioni, effettuate dalle strumentazioni radar, sono soggette a criticità non trascurabili, che se tralasciate conducono ad un'errata stima delle precipitazioni. L'informazione radar, infatti, rilevata ad una prefissata elevazione, fornisce una misura indiretta della precipitazione al suolo, ed è soggetta a numerose cause di errore, che possono portare ad una notevole sovrastima o sottostima del fenomeno. È possibile classificare queste fonti di errore in: errori "strumentali" (o "non-meteorologici"), o come errori "meteorologici". Di seguito, si riportano i fattori maggiormente comuni, che determinano una variabilità della qualità dell'informazione radar:

- *Presenza degli echi di terra (clutter)*

Gli echi da terra sono i segnali di ritorno che derivano dall'intercettazione, da parte del fascio radar, di ostacoli fissi, naturali o artificiali, che interferiscono con la propagazione del flusso elettromagnetico. Tutti gli echi dovuti a bersagli "non meteorologici" vengono denominati *clutter*.

- *Occlusione parziale del fascio radar (shielding o beam-blocking)*

Questa tipologia di errore è possibile considerarla una sottoclasse degli echi da terra, infatti, consiste nell'intercettazione del fascio radar di un ostacolo naturale, dovuto all'orografia del terreno, che determina, oltre all'impossibilità di propagazione del fascio, una diminuzione dell'energia incidente sui *target*, e quindi una sottostima del valore di riflettività.

- *Attenuazione del segnale*

Una possibile fonte di riduzione del segnale, captato dal ricevitore della stazione, è la presenza di strati di gas (azoto, ossigeno, vapore acqueo) in atmosfera, lungo la direzione di propagazione da parte dell'onda elettromagnetica. Tale attenuazione è direttamente proporzionale alla frequenza dell'impulso elettromagnetico.

- *Precipitazioni presenti al di sotto del fascio radar*

L'errore, in questo caso di sottostima della stima della precipitazione, può essere dettato dalle modalità di scansione, infatti, è possibile che l'angolo di elevazione scelto, conduca ad una mancata intercettazione da parte del fascio radar di precipitazioni poste ad una quota minore (esempio: precipitazioni di natura orografica).

- *Evaporazione al di sotto del fascio radar*

L'errore, in questo caso di sovrastima delle precipitazioni, può essere dettato dal fatto che, al di sotto della direzione di propagazione del fascio radar, siano presenti masse d'aria



particolarmente secche che si scontrano con le meteore durante la loro caduta, provocandone l'evaporazione e riducendone, quindi, l'intensità delle precipitazioni al suolo.

- *Pioggia con gocce fini*

L'erronea osservazione della precipitazione può essere causata dalla presenza di pioggia debole (*drizzle*), le cui particelle molto sottili, non vengono correttamente rilevate dallo strumento radar, in termini di riflettività.

- *Distanza di propagazione*

Il fascio, proporzionalmente al crescere della distanza della sorgente radar, incrementa la propria larghezza, generando un aumento di dimensioni della "cella", e integrando in un unico pixel, quindi, informazioni molto eterogenee causando un decremento della qualità del dato di ritorno.

- *Propagazione anomala (ANAPROP)*

Eventuali fenomeni di inversioni termica in atmosfera generano una propagazione anomala del fascio radar, provocando un'erronea interpretazione dell'informazione radar. Infatti, in questo caso, il radar registra echi dovuti alla riflessione del segnale sul terreno, non fornendo le informazioni relative a volumi atmosferici ricercate.

- *Esistenza della "bright band"*

L'intersezione da parte del fascio radar dello strato di fusione, ovvero quella porzione di atmosfera posta, ad una determinata quota, in cui la neve fonde e diventa precipitazione, causa una forte sovrastima della riflettività.

- *L'influenza della tipologia di precipitazione.*

L'errore dell'osservazione radar può essere determinato dalla configurazione del fenomeno precipitativo osservato. Infatti, sia in caso di precipitazioni convettive, con elevato sviluppo verticale, sia in caso di piogge stratiformi, caratterizzate da una struttura fortemente stratificata, è possibile che il fascio radar intercetti informazioni ad una quota poco rappresentativa dell'intero corpo nuvoloso.

- *Instabilità nel funzionamento del sistema radar*

Una fonte di errore è quello relativo al possibile malfunzionamento della strumentazione, infatti questa può essere soggetta nel tempo a variazioni della propria efficienza, (esempio: variazioni nel tempo dell'intensità dell'impulso radar).

I Prodotti Radar

L'antenna durante la scansione è in grado di ruotare, sia nel piano orizzontale intorno alla stazione, variando il proprio azimut, che in quello verticale, variando il proprio angolo di elevazione, in modo da ottenere una scansione di tipo volumetrico ed informazioni quanto più dettagliate dei processi meteorologici in atto, all'interno dell'area coperta dal proprio raggio di scansione. L'importanza dell'informazione radar non è, però, legata all'uso diretto dei dati riflettività, campionati lungo la superficie del cono, descritto dal fascio radar attraverso la rotazione dell'antenna a varie elevazioni, ma alle mappe che vengono estratte da questi volumi, mediante opportuni algoritmi. Dall'elaborazione dei volumi di dati è possibile ottenere numerose tipologie di prodotti. In seguito, si riportano quelli comunemente utilizzati, e che vengono giornalmente generati e trasmessi dal Dipartimento di Protezione Civile.

1. *PLAN POSITION INDICATOR (PPI)*

Il prodotto PPI è una proiezione al suolo dei dati acquisiti dal radar meteorologico lungo una superficie conica, il cui vertice coincide con la stazione radar. Tale informazione viene prodotta mediante una metodologia di scansione caratterizzata da: un angolo di elevazione fisso, e un azimut che invece viene fatto variare di 360° , Figura A1.5.

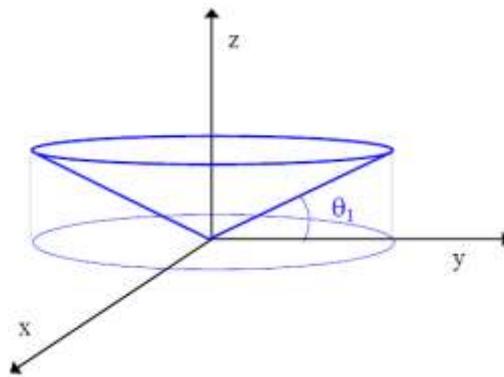


Figura A1.5 – PPI: proiezione al suolo dei dati acquisiti su una superficie conica.

2. *RANGE HEIGHT INDICATOR (RHI)*

Il prodotto RHI è una modalità di rappresentazione dei dati, che deriva da una scansione verticale, effettuata dalla stazione meteorologica mantenendo fisso l'angolo azimutale e facendo variare l'elevazione, in modo da ottenere un'informazione sotto forma di sezione verticale, Figura A1.6.

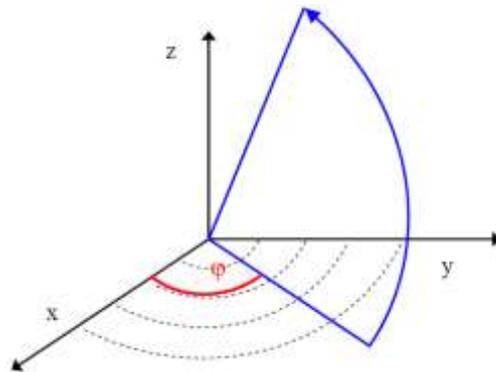


Figura A1.6 – RHI: scansione verticale in corrispondenza di un determinato azimut.

3. COSTANT ALTITUDE PLAN POSITION INDICATOR (CAPPI)

Il CAPPI è una rappresentazione del dato radar, riferito ad un piano la cui quota è predeterminata. Questa informazione viene generata da una scansione volumetrica completa che avviene facendo variare l'azimut per 360°, e mantenendo fissa l'elevazione, che viene successivamente sezionata a quote differenti per ottenere un'informazione riferita ad un piano a quota fissa (altitudini di 2000 m, 3000 m e 5000 m), Figura A1.7.

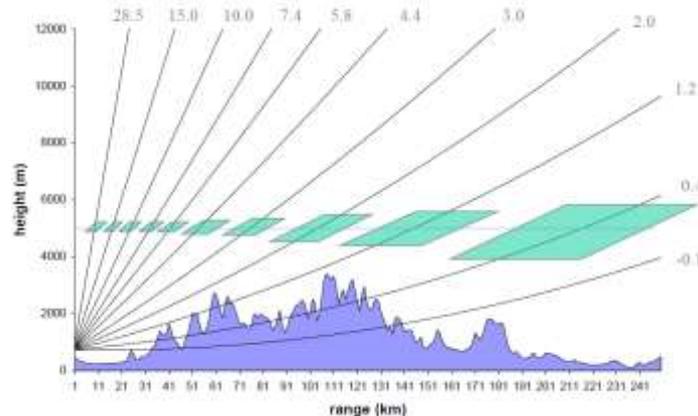


Figura A1.7 -CAPPI: "taglio" ad una determinata quota.

4. VERTICAL MAXIMUM INTENSITY (VMI)

Il VMI è una rappresentazione del dato radar, in cui si riportano per ogni punto del dominio, il valore massimo del parametro investigato lungo la verticale, Figura A1.8. Dunque, in questo caso il prodotto è relativo a misurazioni effettuate a quote variabili.

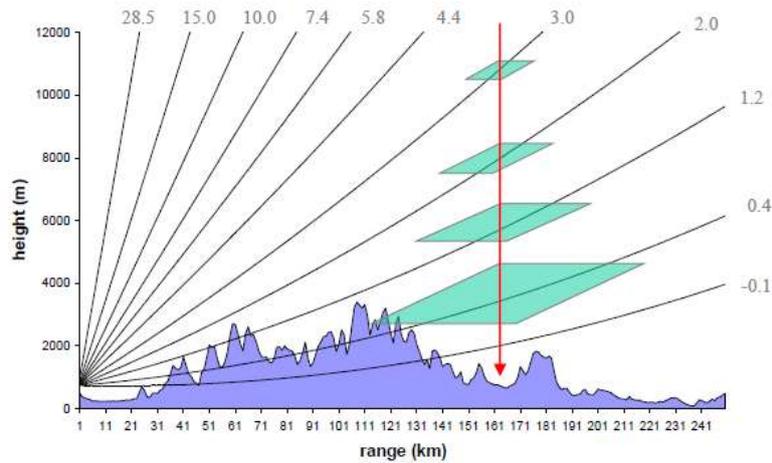


Figura A1.8 - VMI: proiezione al suolo del massimo di riflettività.

5. SURFACE RAINFALL INTENSITY (SRI)

L'SRI è una mappa relativa alla stima dell'intensità di precipitazione al suolo (mm/h), che deriva da un'elaborazione del dato di riflettività Z, e alla sua successiva conversione in dato di pioggia istantaneo mediante l'applicazione delle leggi empiriche Z-R, che nel caso del Dipartimento di Protezione Civile risulta essere quella di Marshall&Palmer (1948). Il valore di SRI è calcolato come media ponderata del valore di precipitazione, sulla base della qualità del dato dei volumi campionati lungo la verticale di ogni cella.



ALLEGATO II - Le Reti di Rilevamento delle Fulminazioni

Introduzione: Le scariche Elettriche

In questo breve paragrafo introduttivo si riportano alcune nozioni chiave sulla formazione e sulla classificazione delle fulminazioni, necessarie per comprendere il contenuto dei paragrafi successivi relativi ai sistemi di rilevamento.

La formazione delle scariche elettriche

In meteorologia il fulmine (detto anche saetta o folgore) è un fenomeno atmosferico, legato all'elettricità atmosferica, che consiste in una scarica elettrica improvvisa e intensa (i valori sono tipicamente compresi tra 10 e i 200 kA), che si manifesta con un effetto luminoso, (detto "lampo"), ed uno sonoro (detto "tuono"), che non vengono percepiti simultaneamente dall'osservatore posto a terra a causa delle diverse velocità di propagazione della luce (300.000 Km/s) e del suono (340 m/s). L'innesco della scarica elettrica è generato dall'istaurarsi, per processi naturali, di un elevata differenza di potenziale elettrico tra due diversi corpi conduttori, che possono essere costituiti da: due nubi, una nube e la superficie terrestre, o tra due diverse parti della stessa nube. In condizioni ordinarie, non si osserva un passaggio di corrente elettrica essendo i corpi separati dall'aria, materiale isolante, ma al crescere del numero delle cariche, aumenta la differenza di potenziale tra i due corpi superando la cosiddetta rigidità dielettrica del mezzo fisico frapposto, provocando, dunque, il verificarsi della scarica elettrica tra i corpi, che produce la perforazione del materiale.

Le nubi tipicamente coinvolte in questi processi di elettrificazione e generazione delle scariche elettriche sono strettamente connesse al verificarsi di fenomeni temporaleschi, e sono dette cumulonembi. Questa tipologia di nube è infatti caratterizzata da un elevato sviluppo verticale (Figura A2.1) e dalla presenza all'interno del corpo nuvoloso di intensi moti convettivi che spostano verso l'alto l'aria umida, sotto forma di gocce d'acqua, e verso il basso quella fredda, sotto forma di ghiaccio, provocandone uno sfregamento continuo acqua-ghiaccio, e permettendone il fenomeno del caricamento elettrostatico dei corpi in atmosfera. In particolare, le particelle più piccole tendono ad acquisire cariche negative, mentre le più grandi acquisiscono cariche positive, e separandosi per effetto delle correnti ascensionali e della forza di gravità, si dispongono secondo uno schema bi (o tri polare), con le cariche negative nella parte bassa della



nube e quelle positive nella parte alta. Dunque, all'interno della nube, è infatti possibile individuare tre differenti zone caratterizzate da cariche diverse: la zona inferiore, costituita di goccioline d'acqua o di fiocchi di neve, elettrizzata negativamente tranne un nucleo centrale elettrizzato positivamente, la centrale, costituita di cristalli di ghiaccio e/o di gocce d'acqua soprafusa elettrizzata negativamente, la superiore, interamente costituita di cristalli di ghiaccio, elettrizzata positivamente. Le differenze di potenziale, tra le regioni caricate elettrostaticamente con polarità opposte, possono raggiungere le centinaia o migliaia di milioni di Volt, causando il superamento della rigidità dielettrica dell'aria e l'innesco delle scariche elettriche, la cui intensità si differenzia in base quantità di carica accumulata, e in relazione alla distanza fra i due poli. La suddetta separazione produce enormi differenze di potenziale sia all'interno della nube, sia fra la nube e la terra, che per induzione tende a caricarsi positivamente



Figura A2.1 - Tipica forma ad incudine assunta dal cumulonembo in fase matura.

Generalmente, il fenomeno della fulminazione ha effettivamente inizio quando dalla nube diparte verso il suolo una carica negativa, detta carica pilota, che procede verso il basso zigzagando con velocità di piccola entità (formazione del “canale ionizzato di prescarica”). Una volta che la scarica pilota arriva al suolo, da quest'ultimo parte una “scarica di ritorno” di polarità positiva, diretta verso l'alto. Quando una scarica leader, discendente, si incontra con una leader di segno opposto, proveniente dal terreno, si creano onde d'urto che provocano il tuono, e si apre un canale attraverso cui inizia lo scambio delle cariche elettriche, che surriscalda il percorso fino a trentamila gradi e lo rende visibile.



La classificazione delle scariche elettriche

Il processo appena descritto, in relazione al caso comune dei fulmini nube-terra con una carica negativa discendente in realtà può essere applicato anche in altre configurazioni possibili, infatti esistono più tipologie di fulmine, che possono essere identificate in base: all'area in cui si sviluppa il fenomeno, la polarità e la direzione di propagazione (Figura A2.2).

In particolare, base all'area in cui si sviluppano, distinguiamo tipicamente i fulmini in:

- Nube-Nube (*Cloud to Cloud* – CC);
- Intranube (*Intracloud* – IC);
- Nube-Suolo (*Cloud to Ground*- CG).

I fulmini nube-suolo, in base alla loro direzione di propagazione, possono essere di tipo:

- Discendente, se il fulmine si propaga dalla nube verso terra;
- Ascendente, se il fulmine si propaga dalla terra verso la nube.

Se si considera la polarità della elettrica, i fulmini sono classificati in:

- Positivi;
- Negativi.

Combinando la polarità e la direzione di propagazione, possono avere luogo quattro diversi casi:

- Fulmini negativi discendenti, in cui la scarica pilota ha carica negativa e parte dall'alto;
- Fulmini positivi discendenti, in cui la scarica pilota ha carica positiva e parte dall'alto;
- Fulmini negativi ascendenti, in cui la scarica pilota ha carica negativa e parte dal basso;
- Fulmini positivi ascendenti, in cui la scarica pilota ha carica positiva e parte dal basso.

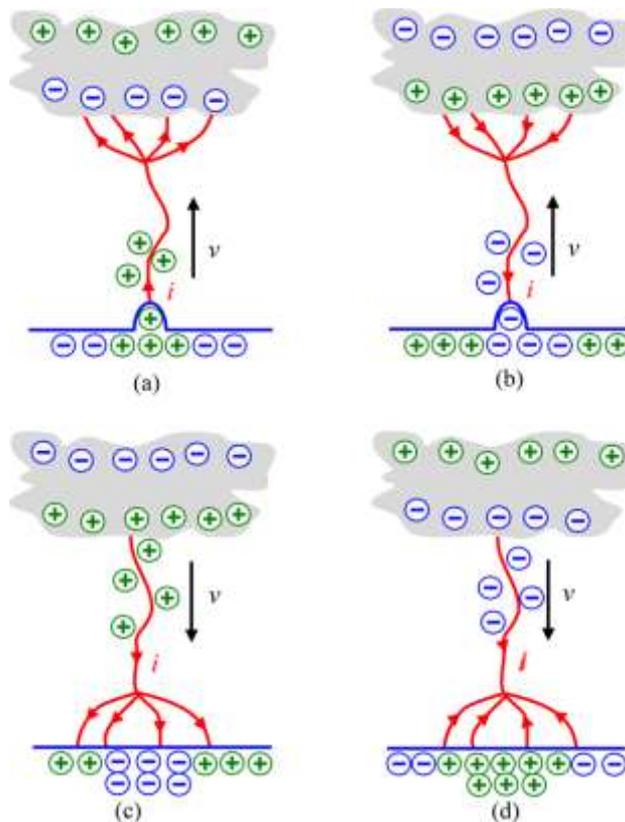


Figura A2.2 – Classificazione della tipologia di fulminazioni, in base alla polarità e alla direzione di propagazione.

I Sistemi di Rilevamento delle Fulminazioni

I sistemi di rilevamento delle fulminazioni appartengono alla categoria di strumenti e tecnologie definite di *remote-sensing*, ovvero a quella classe di tecnologie che permettono di valutare, senza che vi sia “contatto” diretto tra la strumentazione e l’oggetto dello studio, numerosi parametri che caratterizzano il fenomeno investigato relativo ai processi e le manifestazioni delle scariche elettriche, tra cui: ubicazione (in termini di coordinate geografiche e di area di innesco), tempo di accadimento, intensità, polarità, tipologia di scarica (*intracloud IC* o *cloud-to-ground CG*) e numerosi altri.

I sistemi di rilevamento, ad oggi esistenti, sono numerosi e il loro funzionamento si basa sul rilevamento di segnali di natura differente, che appartengono allo spettro audio, visibile ed elettromagnetico. Ad esempio, le reti possono lavorare mediante:

- *rilevamento acustico*, basato sulla propagazione delle onde sonore generate dalla fulminazione (tuono);
- *rilevamento elettrostatico*, basato sulle misurazioni del campo elettrostatico;



- *rilevamento ottico*, basato sulla osservazione delle fulminazioni, effettuate da terra o da satellite;
- *rilevamento elettromagnetico*, basato sulla valutazione del campo elettromagnetico generato dalle scariche elettriche.

Il rilevamento del campo elettromagnetico

Il rilevamento del campo elettromagnetico prodotto delle scariche elettriche è sicuramente l'approccio più affidabile, e maggiormente utilizzato al giorno d'oggi. Il funzionamento di questi sistemi è fondato sull'utilizzo di un apparato di rilevamento composto da un sensore o una rete di sensori, solitamente almeno cinque, che possono essere posti a terra (*ground-based*) o su satellite (*satellite-based*).

Il funzionamento avviene mediante la misurazione, da parte di ogni sensore, dotato di antenna, dell'impulso elettromagnetico prodotto dalle scariche elettriche, e l'invio delle informazioni registrate ad un processore centrale, che le depura dagli errori e dunque le elabora, utilizzando un algoritmo di geolocalizzazione. Ad oggi, i sistemi comunemente impiegati sono le reti di sensori *ground-based*, che operano intercettando diversi range di frequenza e dunque permettono di rilevare le emissioni associate a differenti processi, che costituiscono il fenomeno delle fulminazioni. Per tutte le applicazioni dei dati sui fulmini, è fondamentale comprendere la tipologia di informazioni fornite dai vari sistemi di monitoraggio al fine di interpretarle correttamente e sfruttarle al meglio. Di conseguenza, i dati sui fulmini forniti da sistemi, operanti attraverso intervalli di frequenza differenti, spesso contengono informazioni complementari, e per questo spesso vengono utilizzati in modo combinato, al fine di ottenere un maggiore grado di accuratezza delle informazioni prodotte. Il prodotto delle reti di rilevamento delle fulminazioni può essere utilizzato per individuare l'area dove è presente l'attività elettrica, collegata alla presenza nubi temporalesche, e dunque identificare i territori caratterizzati da una maggiore probabilità di essere coinvolti da intensi eventi convettivi. I sistemi moderni sono in grado di determinare la posizione, l'intensità e il tipo di fulmine e tenere traccia del movimento delle cellule convettive temporalesche e l'evoluzione della loro struttura in tempo reale, caratteristica che risulta particolarmente interessante per un incremento dell'accuratezza delle previsioni meteorologiche di questi fenomeni, che possono dare l'innescò a precipitazioni molto intense e ingenti effetti al suolo. La geolocalizzazione delle scariche connesse al fenomeno delle fulminazioni, assume una funzione rilevante in un'ampia varietà di applicazioni. Gli utenti tipici delle informazioni sui fulmini includono agenzie meteorologiche nazionali e regionali e autorità



aeronautiche o del traffico aereo, comprese strutture di lancio nello spazio, operatori di trasmissione e distribuzione di energia elettrica, operatori di parchi eolici e altri servizi pubblici.

Nei paragrafi successivi vengono analizzate nel dettaglio: le caratteristiche relative alle diverse reti operanti su differenti gamme di frequenza, le tecniche di geolocalizzazione, le caratteristiche prestazionali delle tecnologie di rilevamento, e le metodologie di convalida delle informazioni prodotte.

Range di frequenze impiegati per il rilevamento

Un sistema di rilevamento delle fulminazioni può funzionare utilizzando range di frequenze differenti, essendo lo spettro delle frequenze generate dalle fulminazioni molto ampio (da pochi fino a 10^{20} Hz). Per tale ragione le tecnologie utilizzate possono essere differenti, e intercettare segnali appartenenti a differenti gamme di frequenze, le più comunemente utilizzate sono:

- VLF (*Very Low Frequency*) – [3-30 kHz];
- LF (*Low Frequency*) – [30 kHz-3 MHz];
- HF (*High Frequency*) – [3-30 MHz];
- VHF (*Very High Frequency*) – [30-300 MHz].

Naturalmente, tali tecnologie possono essere utilizzate in modo combinato in modo da ottenere incrementare la qualità e l'accuratezza dell'informazione elaborata.

Tecniche di geolocalizzazione

I sistemi appena visti, per la geolocalizzazione dei fulmini, si servono di tecniche differenti per il loro funzionamento, per i sistemi *ground-based* quelle maggiormente impiegate sono:

- ***Time of Arrival (TOA)***

La tecnica del *time of arrival* (TOA) può essere applicata a sistemi di rilevamento *ground-based* operanti in qualsiasi intervallo di frequenze. Questa metodologia si basa sul rilevamento dell'istante temporale di occorrenza di una caratteristica specifica dell'onda elettromagnetica prodotta da un evento elettrico, effettuato contemporaneamente da più sensori. La differenza costante degli intervalli temporali in cui si verifica una caratteristica specifica, misurati da due diversi sensori, definisce un'iperbole e dunque più coppie di sensori forniscono più iperboli, le cui intersezioni identificano l'esatta posizione del fenomeno investigato. In alcune condizioni, possono essere generate iperboli con solo tre sensori, che, però, si traducono in due intersezioni ravvicinate, portando così a una definizione approssimativa della posizione.



Pertanto, la tecnica TOA richiede misurazioni simultanee di un evento da almeno quattro sensori per geolocalizzare l'evento in modo univoco, e identificare l'istante di accadimento, latitudine e longitudine. Per calcolare l'altitudine di un evento, sono invece necessarie misurazioni simultanee di almeno cinque sensori.

Nella tecnica TOA, l'errore di posizione è direttamente proporzionale all'errore nella misurazione del tempo (*timing error*), ma risulta indipendente dalla distanza tra sensori, o le strumentazioni e l'evento. I principali fattori che introducono l'errore nella definizione del tempo di arrivo sono:

- Le variazioni di elevazione del terreno, che introducono un ritardo nel tempo di arrivo degli impulsi elettromagnetici all'apparato ricevente dello strumento;
- La propagazione sopra il suolo a conducibilità finita, che introduce un ritardo di arrivo e un'attenuazione, dipendente dalla frequenza dei segnali.

L'errore temporale introdotto dalle variazioni di conducibilità del terreno e del suolo può essere mitigato applicando correzioni sito-specifiche ai tempi di arrivo misurati dai sensori. Questo risulta necessario specialmente nel caso di sistemi di monitoraggio a "lungo raggio", in cui le onde elettromagnetiche identificate sono fortemente influenzate dalla propagazione, che avviene per migliaia di chilometri. Ulteriori fattori che contribuiscono, seppur in maniera minore, all'errore temporale sono: l'errore GPS, la formazione di canali ionizzati non verticali e la complessità della forma delle onde elettromagnetiche prodotte dalle fulminazioni.

- ***Direction Finding (DF)***

La tecnica di *direction finding* impiega tipicamente due diverse modalità in relazione alla gamma di frequenza a cui lavora l'apparato *ground-based*:

- La ricerca della direzione magnetica (MDF), generalmente utilizzata nella gamma delle VLF e LF;
- L'interferometria (IF), generalmente utilizzata nell'intervallo di frequenza delle VHF.

La tecnica di ricerca della direzione magnetica (MDF) si basa generalmente sull'impiego di due antenne ad anello (*loop*), ortogonali fra loro, per misurare la forma d'onda del campo magnetico, prodotto da una scarica elettrica. Il rapporto tra valori, relativi ad una caratteristica della forma d'onda selezionata (generalmente il picco), misurati da ciascun *loop* può essere utilizzato per calcolare l'azimut dell'evento rispetto alla posizione del sensore, fornendo di conseguenza un vettore direzione che unisce la posizione del sensore e quella della fulminazione. Le intersezioni di due o più vettori direzione, derivanti da due o più i sensori che misurano lo stesso evento



contemporaneamente, permettono di identificare la corretta posizione dell'evento. Questa tecnica può essere impiegata per valutare inoltre: il tempo, la latitudine, e la longitudine di un evento lampo. Mentre, per calcolare l'altitudine sono necessari due o più sensori di campo magnetico a tre assi, che misurano simultaneamente sia gli angoli di azimut, che quelli di elevazione dei fulmini.

La tecnica dell'analisi interferometrica (IF) del campo prodotto dal fulmine si basa sull'impiego di più sensori, ciascuno costituito da una serie di antenne ravvicinate, con distanza tra le singole antenne nell'*array* molto ristretta. Le informazioni sull'angolo di arrivo (azimut) possono essere derivate dalla differenza dell'ora di arrivo (fase) registrate dalle singole antenne che costituiscono il sensore, in relazione ai segnali generati nella gamma del VHF, associati alle scariche. La misurazione simultanea dell'azimut di un evento lampo su due o più sensori può essere utilizzata per determinare la posizione dell'evento. L'impiego di questa tecnica permette, dunque, di definire il tempo di accadimento, latitudine, longitudine. Per definire l'altitudine si devono utilizzare due o più sensori, che misurano contemporaneamente l'azimut e l'angolo di elevazione.

Nelle reti di monitoraggio *ground-based*, sia le tecniche di ricerca della direzione magnetica (MDF) che quelle interferometriche (IF) sono soggetti a una dipendenza dagli errori di sito, di cui si deve tenere conto e correggere per ottenere stime angolari accurate, e quindi localizzazioni corrette. Infatti, un errore di angolo costante sul sensore si traduce in un errore lineare, crescente al crescere della distanza antenna-evento.

- ***Combinazione di più tecniche***

I sistemi di rilevamento a medio e lungo raggio possono utilizzare una combinazione di tecniche TOA e MDF allo scopo di sfruttare i punti di forza combinati di entrambe le tecniche. L'uso combinato dei due algoritmi permette la geolocalizzazione con un minimo di due sensori contribuenti e con un errore indipendente dalla distanza tra il punto di innesco della scarica elettrica e l'ubicazione della strumentazione a terra.



Caratteristiche prestazionali dei sistemi di rilevamento operanti mediante vari range di frequenza

Si riportano in seguito le caratteristiche prestazionali che contraddistinguono le reti operanti nei range di frequenza più comunemente impiegati, (Tabella A2.1).

- VLF-LF

Le reti di monitoraggio *ground-based* che operano nelle gamme VLF-LF sono generalmente identificate come strutture che garantiscono una copertura “a lungo raggio”, a scala continentale o nazionale, fornendo un rilevamento continuo su terra e oceano. Infatti, questa tipologia di tecnologia sfruttando la propagazione delle onde elettromagnetiche a bassa e bassissima frequenza, che avviene mediante un’onda di terra tra il suolo e la ionosfera, la cui lunghezza d’onda generalmente comprese tra 10 km e 100 km, e soggetta a decadenza dell’ampiezza di tali segnali risulta relativamente minima, permette di rilevare le scariche a migliaia di chilometri di distanza rispetto ai sensori che costituiscono la rete. Inoltre, i picchi di potenza vengono irradiati dai fulmini nel range VLF-LF, dunque le reti che operano in queste gamme di frequenza generalmente rilevano e geolocalizzano gli impulsi elettromagnetici relativi ai fenomeni, associati alle fulminazioni, maggiormente “energetici”. Questi fattori rendono questa gamma di frequenze adatta per sistemi di rilevamento a terra a “lungo raggio”, essendo capaci di rilevare aree a distanza di alcune migliaia di chilometri dalla posizione delle strumentazioni adottate. Le caratteristiche prestazioni e l’efficienza della rete risultano dipendenti dalla sensibilità del sensore, dall’interasse dei sensori (solitamente migliaia di chilometri), delle tecniche di geolocalizzazione utilizzate e della regione geografica considerata

I dati sui fulmini provenienti da tali sistemi in genere consistono in: tempo di occorrenza di ogni evento di fulmini, latitudine, longitudine, altitudine, angolo di incidenza. Alcuni sistemi di monitoraggio a lungo raggio forniscono anche la polarità e la corrente di picco stimata degli eventi di fulmini. Al momento, i sistemi di rilevamento a lungo raggio non hanno elevata efficienza nella distinzione delle scariche *cloud-to-ground* (CG) e *intracloud* (IC), l’efficienza varia poco tra i sistemi VLF e LF. I sistemi che lavorano alle LF e VLF, identificano le scariche CG e una piccola percentuale delle scariche IC (poco energetiche), ma che non riescono a essere distinte. Le caratteristiche prestazionali migliorano all’aumentare del numero di sensori utilizzati per coprire una particolare area e, di conseguenza al decrescere del loro interasse, mentre decadono gradualmente nelle aree perimetrali della zona di copertura.



- HF

I sistemi di monitoraggio operanti nella gamma delle alte frequenze (HF), rilevano gli impulsi elettromagnetici che si propagano nel medesimo range, caratterizzati da maggiori fenomeni dissipativi durante la propagazione e minore potenza irradiata dai processi delle fulminazioni. Essendo queste componenti soggette a fenomeni altamente dissipativi, devono essere intercettate entro diverse decine di chilometri dalla posizione in cui si verifica la scarica elettrica. Per tale ragione possiamo definire i sistemi che lavorano alle alte frequenze a “medio raggio”, permettendo una copertura a scala nazionale o regionale.

I dati provenienti da questa tipologia di strumentazione consistono in genere in: tempo di occorrenza, latitudine, longitudine, angolo di incidenza, corrente di picco e polarità stimati, classificazione del tipo di scarica (nuvola-nuvola o nuvola-suolo).

- VHF

Le stazioni di rilevamento dell'attività elettrica, che operano in questo range di frequenza, sono costituite da sensori ad altissima frequenza (VHF), che intercettano onde elettromagnetiche caratterizzate da lunghezze d'onda che variano tra 1 m e i 10 m, e che non si propagano come onde di superficie, ma sono intercettate da eventuali dislivelli del terreno e dagli edifici, e dunque soggette ad intensi fenomeni dissipativi. Per questo motivo si fa riferimento alle reti di rilevamento a terra che operano in VHF come sistemi “a corto raggio”, fornendo generalmente una copertura regionale, che deve essere garantita mediante un interasse ristretto tra i sensori operanti nella rete (circa un centinaio di chilometri). Le aree intercettate sono infatti di dimensioni tipicamente di 200 x 200 km², poiché la copertura di aree più grandi sarebbe molto complessa e molto dispendiosa. Infatti, a seconda della tecnologia in uso, il costo di ogni singola antenna può essere elevato, comportando quindi ad una riduzione della densità delle antenne, una copertura ridotta, e un decremento della risoluzione e accuratezza dell'informazione. Questa tipologia di rete viene utilizzata solo in rari casi, in cui è di fondamentale importanza il rilevamento delle scariche nube-nube, ad esempio aree predisposte ai lanci spaziali, o grandi aeroporti.

Il vantaggio dell'utilizzo di una rete sensoristica, operante nel range di frequenza delle VHF, è, infatti, il fatto che queste forniscono un dato che consiste in una “mappatura” delle fulminazioni, molto dettagliata, che può essere utilizzato per applicazioni operative in tempo reale, per la ricerca, e aree ad alto impatto. I dati provenienti da tali sistemi, a “corto raggio”, devono essere soggetti ad una elaborazione per eliminare la presenza di un rumore di fondo nella gamma di frequenza dei sensori, e consistono in genere di tempo di occorrenza, latitudine, longitudine,



angolo di incidenza, altitudine. La corrente di picco stimata e la polarità degli eventi di fulmini non sono riportate dai sistemi di mappatura VHF. I sistemi che operano alle VHF permettono di individuare le scariche elettriche *intracloud* (IC) che si verificano all'interno delle nubi temporalesche, sia positive che negative, ma la classificazione del tipo di fulmine delle singole fonti non è applicabile. Al fine di procedere con la classificazione dei fenomeni, è generalmente necessario accoppiare i dati dei sistemi VHF con i dati provenienti da una fonte di riferimento come videocamere o sistemi che operano a campi VLF e HF. Inoltre, per determinare la polarità e le correnti di picco di tali colpi è necessaria l'integrazione dei dati prodotti da un sistema operante negli intervalli VLF-HF.



Tabella A2.1 - Sistemi di rilevamento delle fulminazioni e caratteristiche prestazionali in base al range di frequenza impiegato

Sistema di rilevamento delle Fulminazioni mediante strumentazione a terra (ground-based)				
Tipologia disistema	VLF	LF	HF	VHF
Range di Frequenze	3-30 kHz	30kHz-3 MHz	3-30 MHz	30-300 MHz
Lunghezza d'onda	10 - 100 km	0.1-10 km	10-100 m	1-10 m
Tipologia di rilevamento	Lungo raggio - scala continentale e mondiale	Medio raggio - scala nazionale o continentale	Corto raggio	Corto raggio - scala regionale
Distanza tra sensori	molte migliaia di Km	200 - 400 km	50-75 km	10-40km per TOA e 150lm per Inferometria
Geolocalizzazione	TOA	TOA	TOA, MDF	TOA, Inferometria
Detection Efficiency:				
CG	20 - 70%	70-90%	80- 95%	>95%
IC	<10%	circa 50%	circa 75%	>95%
Location Accuracy	2km - 10km	100m- 1km	100- <1km (poche centinaia di m)	decine- centinaia di m
Risoluzione Temporale	decine di microsecondi	decine di nanosecondi	decine di nanosecondi	decine (TOA)/centinaia (inf) di microsecondi
Errore - Intensità corrente di picco	25-30%	15-20%	15-20%	Non viene identificata
Errore - Stima Polarità	1-4%	trascurabile	trascurabile	Non viene identificata
Accuratezza nella classificazione degli eventi	NA *	48-96%	48-96%	Non viene identificata



Parametri operativi delle reti di rilevamento

I parametri chiave con cui è possibile definire la rete di rilevamento sotto un punto di vista prestazionale che vengono individuati comunemente (esempio in Bonnet, 2014), possono essere in riassunti come segue:

- *Copertura omogenea*

Lungo l'intera regione di interesse, è di fondamentale importanza che non siano presenti delle aree soggette ad una minor efficienza, la cui eventuale presenza può generare informazioni fuorvianti, derivanti da una variabilità della qualità dei dati.

- *Lunga durata di attività della rete*

Maggiore è il tempo di attività della rete, maggiore sarà la qualità e l'affidabilità dei prodotti da essa generati, in quanto la raccolta di dati effettuata durante il periodo di attività della rete è necessaria per la successiva elaborazione e correzione dei dati rilevati.

- *Numero di sensori che costituiscono la rete*

L'efficienza del monitoraggio è dettata dalla quantità di dati disponibili, che vengono successivamente implementati nelle analisi. L'auto-ridondanza della rete di rilevamento è una caratteristica essenziale, informazioni ridondanti di uno stesso fenomeno provenienti da più sensori permettono di incrementare l'accuratezza delle informazioni e superare le incertezze relative al rilevamento della posizione e i ritardi.

- *Capacità di produrre dati ottimizzati in tempo reale,*

La velocità del dato di ritorno, senza la necessità di una post-elaborazione, è un fattore fondamentale per le applicazioni di *nowcasting* dove un ritorno rapido di un dato affidabile è di primaria importanza.

Caratteristiche prestazionali

Le caratteristiche prestazionali di un sistema di rilevamento sono relative alla capacità del sistema di rilevare, localizzare le scariche elettriche associate alle fulminazioni, e possono essere soggette a numerosi fattori di errore legati alle caratteristiche infrastrutturali della rete, ma anche ad errori di natura esterna, esempio: anomalie di propagazione dovute al territorio, o presenza di rumori esterni. Le principali caratteristiche relative al funzionamento della rete di rivelazione di fulmini sono:



- *L'efficienza di rilevamento (DE)*, il parametro di prestazione chiave che rappresenta il rapporto tra gli eventi rilevati e il numero di eventi reali, sia *intracloud (IC)* che *cloud-to-ground (CG)*.
- *La precisione della posizione (LA)*;
- *La precisione della identificazione della corrente di picco*;
- *L'accuratezza nell'identificazione della polarità*;
- *La capacità di distinzione tra fenomeni cloud-to-ground (CG) e intracloud (IC)*.

Validazione delle caratteristiche prestazionali dei sistemi di rilevamento

Le caratteristiche prestazionali di un sistema di monitoraggio delle fulminazioni determinano la qualità dei dati prodotti, e sono come visto nel paragrafo precedente: l'efficienza di rilevamento (DE), l'accuratezza della identificazione della posizione (LA), l'accuratezza della stima della polarità e della corrente di picco e l'accuratezza nella classificazione del tipo di evento. Per le varie caratteristiche relative ad ogni tipologia di sistema si fa riferimento alla Tabella A2.2. La valutazione della efficienza delle prestazioni della rete, e le tecniche di validazione delle informazioni prodotte, sono molto complesse, per cui non è possibile definire una procedura univoca che funziona correttamente per qualsiasi caso considerato. La difficoltà è data dalle caratteristiche intrinseche del fenomeno delle fulminazioni, di natura casuale, e dalle peculiarità di ogni rete (in termini di copertura, numero di sensori, ecc..) e le caratteristiche locali del territorio investigato.

Si discutono, in questo paragrafo, le diverse metodologie che è possibile impiegare mediante cui le caratteristiche sopracitate possono essere valutate e/o validate. In genere, non è possibile convalidare tutte le caratteristiche prestazionali di una rete di rilevamento utilizzando soltanto uno dei metodi qui esaminati, talvolta è necessaria una combinazione di più tecniche per validare le prestazioni di un apparato di rilevamento, Tabella A2.3. Inoltre, le inter-comparazioni non forniscono misure assolute di nessuna delle caratteristiche prestazionali di una rete di rilevamento, ma piuttosto una stima di quest'ultime. In generale, alcune delle tecniche di valutazione che possono essere utilizzate sono:

- **Autovalutazione**

L'autovalutazione viene effettuata attraverso i dati forniti dalla rete, ed è il modo più semplice ed economico per valutare le prestazioni di una rete, costituita da più sensori posti a terra. Tale metodologia sfrutta i dati, correttamente calibrati e ridondanti, forniti dall'uso simultaneo di una moltitudine di sensori appartenenti ad una stessa rete, e può fornire una misura dell'accuratezza della posizione (LA) e una valutazione dell'efficienza di rilevamento (DE).



Tuttavia, l'uso di questa tecnica non fornisce alcuna stima dell'efficienza di rilevamento della polarità, della corrente di picco e l'accuratezza della classificazione della tipologia di scarica.

- **Misurazioni ottiche con videocamera**

Le immagini fornite da videocamere forniscono dati che possono essere utilizzati per effettuare comparazioni e dunque valutare le caratteristiche prestazionali di tutti i sistemi *ground-based* che operano nelle diverse gamme di frequenze. Le campagne di misurazione possono essere presidiate da operatori o rese automatiche, ma in ogni caso la scala geografica dello studio è molto limitata. Un problema pratico nell'esecuzione di osservazioni effettuate con videocamera è che, poiché le posizioni delle scariche elettriche non sono note in anticipo, potrebbe non essere facile catturarle nel campo visivo della videocamera. Inoltre, a volte tali fenomeni, che si verificano nel campo visivo della telecamera, possono essere oscurati dalla presenza di forti precipitazioni o da nuvole. I parametri che è possibile stimare sono relativi all'accuratezza della localizzazione, della classificazione e del rilevamento. Non possono essere, però, valutate la precisione della stima della polarità e della corrente di picco di un sistema di rilevamento.

- **Torri strumentate e fulmini innescati**

Torri strumentate e fulmini innescati artificialmente consentono di valutare le caratteristiche prestazionali di un sistema di rilevamento, ma tali strumenti richiedono una costosa strumentazione per ogni singolo sito, e talvolta è necessario che siano accoppiati con l'osservazione video. Questa metodologia di validazione consente di effettuare una valutazione della precisione della posizione, dell'efficienza di rilevamento, dell'intensità e la polarità delle scariche elettriche.

- **Confronto tra dati provenienti da sistemi differenti**

Un ulteriore metodo di validazione delle prestazioni di un sistema a terra è sicuramente la comparazione di dati provenienti da tecnologie a terra, operanti in gamme frequenza differenti. Le prestazioni di un apparato possono essere confrontate con un altro utilizzato come riferimento, purché il sistema di riferimento sia ben calibrato, le sue prestazioni siano state caratterizzate in modo indipendente, e le reti, da valutare e di riferimento, si sovrappongano. Questo metodo consente di fare valutazioni su fattori come: l'efficienza di rilevamento, l'accuratezza della localizzazione, polarità e della stima della corrente di picco e accuratezza della classificazione del tipo di fulmine della strumentazione.



Il vantaggio principale di questa tecnica di comparazione dei sistemi di monitoraggio, è che può utilizzare set di dati relativi ad aree molto più grandi rispetto alle tecniche discusse precedentemente, che possono coprire vaste aree geografiche, a seconda delle aree di copertura del sistema test e i sistemi di rilevamento di riferimento. Un'ulteriore opzione per la validazione dell'informazione è l'impiego di dati provenienti da sistemi osservativi differenti, ad esempio quello relativo alle reti di radar meteorologici. La Tabella A2.3 riassume le informazioni che possono essere derivate da comparazioni tra sistemi di monitoraggio che operano nei range di frequenza più comuni: VLF, HF, VHF.

Tabella A2.2 - Sistemi di rilevamento e tecniche di valutazione delle caratteristiche prestazionali.

Sistemi di rilevamento e Tecniche di Validazione			
Tecnica di Validazione	VLF- LF	HF	VHF
Autovalutazione	DE (CG), LA	DE (CG-IC), LA (CG -IC)	DE (IC)
Torri strumentate	DE (CG) LA (CG), accuratezza della definizione della polarità e corrente di picco	DE (CG) LA (CG), accuratezza della definizione della polarità e corrente di picco	DE (CG), LA (CG)
Misurazioni ottiche	DE (CG - IC), LA (CG), accuratezza della definizione della polarità	DE (CG- IC), LA (CG), accuratezza della definizione della polarità	DE (CG -IC)



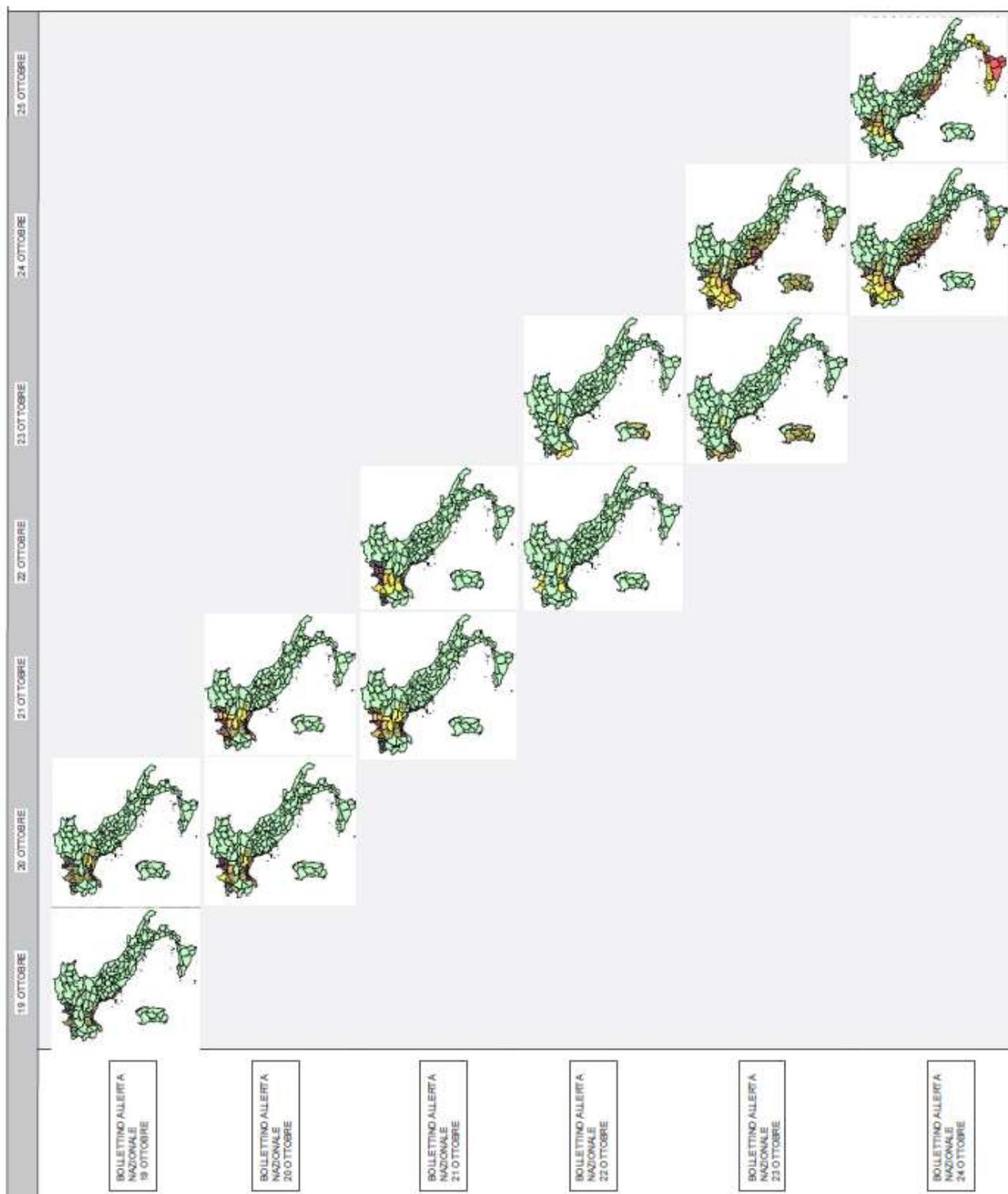
Tabella A2.3 - Parametri che è possibile valutare mediante l'impiego congiunto di due diversi sistemi di rilevamento.

Comparazione tra sistemi di rilevamento differenti		
	Long and medium range (ELF-HF)	VHF mapping
Long and medium range (ELF-HF)	DE (CG), LA (CG), accuratezza della polarità della corrente di picco, classificazione	DE (CG-IC), LA (IC)
VHF mapping	DE (CG), LA (CG)	DE (CG-IC), mapping efficiency



Bollettini di Criticità/Allerta:

Si riporta in seguito l'evoluzione dei Bollettini di Criticità/Allerta in corrispondenza dei giorni interessati:





Bibliografia

- Alfieri, L., Claps, P., & Laio, F. (2010). Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1), 149–158. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-149-2010>
- Battan, L. J. (1965). Some Factors Governing Precipitation and Lightning from Convective Clouds. In *Journal of the Atmospheric Sciences* (Vol. 22, Issue 1, pp. 79–84). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1965\)022<0079:sfgpal>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1965)022<0079:sfgpal>2.0.co;2)
- Bonelli, P., & Marcacci, P. (2008). Thunderstorm nowcasting by means of lightning and radar data: Algorithms and applications in northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1187-2008>
- Bonnet, M. (2014). Status of lightning detection Performances and limitations of existing systems. *International Colloquium on Lightning and Power System*.
- Kotroni, V., & Lagouvardos, K. (2008). Lightning occurrence in relation with elevation, terrain slope, and vegetation cover in the Mediterranean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2008JD010605>
- Libertino, A., Allamano, P., Claps, P., Cremonini, R., & Laio, F. (2015). Radar estimation of intense rainfall rates through adaptive calibration of the Z-R relation. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos6101559>
- Mcgraw, D., Nikolopoulos, E. I., Marra, F., & Anagnostou, E. N. (2019). Precipitation frequency analyses based on radar estimates : An evaluation over the contiguous United States. *Journal of Hydrology*, 573(February), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.032>
- Petersen, W. A., & Rutledge, S. A. (1998). On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. In *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* (Vol. 103, Issue D12).
- S. Gabriele, F. Chiaravalloti, A. P. (2017). La valutazione delle piene nei piccoli bacini. Un problema ancora aperto/Floods Evaluation in Small Catchments. A Yet Open Question. *Rivista L'Acqua*, n. 5-2017.
- Soriano, L. R., De Pablo, F., & Díez García, E. (2001). Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. *Monthly Weather Review*, 129(12), 2998–3003. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2998:RBCPAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2998:RBCPAC>2.0.CO;2)
- Soula, S., & Chauzy, S. (2001). Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. In *Atmospheric Research* (Vol. 56).



www.elsevier.com/locate/atmos

Tapla, A., Smith, J. A., & Dixon, M. (1998). Estimation of convective rainfall from lightning observations. *Journal of Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1497:eocrfl>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1497:eocrfl>2.0.co;2)

ARPA Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali (2019). Eventi idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019 Parte I. Rapporto di evento definitivo. Torino.

Picco B. Relatori Claps P., Rabuffetti D. (2010) Tesi di laurea di secondo livello: Analisi della correlazione tra misure pluviometriche e radar-meteorologiche per differenti tipologie di evento. Politecnico di Torino, Torino

Sitografia

Regione Piemonte: <https://www.regione.piemonte.it/web/>

ARPA Piemonte: <http://www.arpa.piemonte.it/>

ARPA Liguria: <https://www.arpal.liguria.it/>

Dipartimento di Protezione Civile: <http://www.protezionecivile.gov.it/>

Aeronautica Militare Italiana :<http://www.aeronautica.difesa.it/>