



## **D3.2 ALGORITMO DI RICOSTRUZIONE TOMOGRAFICA RRA E RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

### **D3.2 TOMOGRAPHIC RECONSTRUCTION ALGORITHM RRA AND RESULTS OF SIMULATIONS**

Work Package	WP3
Task	3.2
Data	12/07/2019
Partner responsabile del task	POLIMI-DEIB
Versione	1.1
Autore	Angelo Sileo, Michele d'Amico (POLIMI-DEIB)
Revisore	Roberto Nebuloni (CNR-IJET)

Riassunto	Questo documento descrive l'algoritmo di ricostruzione tomografica dei campi di precipitazione sviluppato nel corso del progetto MOPRAM. Vengono inoltre mostrati i risultati della ricostruzione di una serie di mappe radar.
Parole chiave	Algoritmo tomografico, mappe radar, simulazioni.



## Sommario

Introduzione .....	3
Eventi radar e distribuzione dei collegamenti radio .....	4
Ricostruzione tomografica.....	5
Simulazioni.....	7
Prima simulazione – Quantizzazione 0,1 dB – Risoluzione temporale: 76 s .....	8
Seconda simulazione– Quantizzazione 1 dB – Risoluzione temporale: 76 s .....	10
Terza simulazione– Quantizzazione 1 dB – Risoluzione temporale: 15 minuti.....	13
Valore medio dell’attenuazione ogni 15 minuti.....	14
Media pesata dell’attenuazione ogni 15 minuti.....	17
CONCLUSIONI .....	20
RIFERIMENTI .....	22



## GLOSSARIO

**RRA** Rain Reconstruction Algorithm

**MOPRAM** Monitoraggio delle Precipitazioni mediante l'utilizzo di reti Radio a Microonde

**WP** WorkPackages

## Introduzione

Questo documento descrive l'algoritmo di ricostruzione tomografica dei campi di precipitazione RRA sviluppato nel corso di questo WP e la sua validazione attraverso simulazioni. Nel *deliverable 2.1* vengono forniti gli elementi teorici riguardo l'attenuazione che subisce un segnale alle frequenze delle microonde il cui percorso di propagazione è interessato da precipitazioni. Partendo da questo fenomeno fisico l'algoritmo RRA è in grado di ricostruire i campi di precipitazione da misure di attenuazione collezionate da un insieme di collegamenti radio su una specifica area. In questa fase iniziale, l'algoritmo è stato validato su una serie di mappe di pioggia sintetiche, ottenute da una precedente campagna di misure, utilizzando una distribuzione realistica di collegamenti a microonde su cui calcolare l'attenuazione da pioggia direttamente dalle mappe. Prendendo in considerazione un intero evento di precipitazione, costituito da un insieme di mappe, i risultati osservati e mostrati in questo documento riguardano principalmente la differenza nell'accumulo di precipitazione su una specifica area ottenuto dalle mappe radar e dalle ricostruzioni. Con l'obiettivo di simulare l'effetto dei dati di attenuazione ottenuti da una rete reale di collegamenti a microonde, sono stati osservati i risultati variando la risoluzione temporale e la quantizzazione delle attenuazioni in ingresso all'algoritmo.

Questo documento è strutturato come segue:

Il primo paragrafo presenta gli elementi alla base delle simulazioni, ossia le mappe di pioggia ottenute dal radar e la distribuzione dei collegamenti.

Nel secondo paragrafo viene descritto l'algoritmo RRA e come questo è stato impiegato nelle simulazioni.

Il terzo paragrafo è dedicato alle simulazioni e mostra i risultati delle simulazioni su un evento di pioggia al variare di diversi parametri, opportunamente descritti.

Infine, nell'ultimo paragrafo sono presenti le conclusioni su quanto sviluppato e indicazioni per il prossimo WP.

## Eventi radar e distribuzione dei collegamenti radio

Gli eventi di pioggia per le simulazioni appartengono all'insieme NPC registrati nel corso di una precedente campagna sperimentale dal radar meteorologico di Spino d'Adda. Ogni evento è costituito da un insieme di mappe collezionate con una risoluzione di 76 s; la dimensione di ciascuna mappa è 40 per 40 km<sup>2</sup> e ogni *pixel*, la cui dimensione è 0,5 x 0,5 km<sup>2</sup>, contiene un valore di intensità di precipitazione (mm/h). Questo documento mostra i risultati della ricostruzione di un evento, NPC 436, misurato nel corso del 16/10/1990 composto da 391 mappe (più di 8 ore). Per effettuare le simulazioni sono stati scelti 26 collegamenti presi da una rete di ponti radio reale. L'area coperta da questi collegamenti è di 36 x 23 km<sup>2</sup>, pertanto per effettuare l'analisi è stata ritagliata un'area di queste dimensioni dalle mappe radar originali. La figura 1 mostra la distribuzione dei collegamenti selezionati su una mappa dell'evento selezionato.

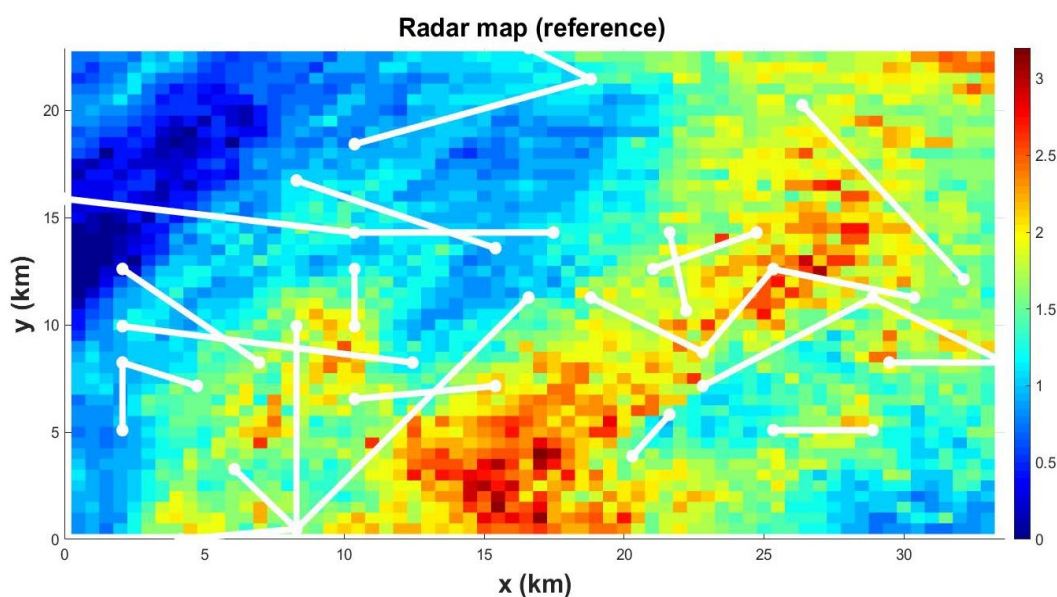


Figura 1 distribuzione dei 26 collegamenti su una mappa radar dell'evento selezionato.

## Ricostruzione tomografica

La frequenza dei collegamenti è impostata a 23 GHz. Successivamente si calcola l'attenuazione specifica  $k$  in ogni pixel considerando ciascun valore di intensità di precipitazione  $R$  applicando l'equazione (1) data da ITU-R p.838 [1]; l'attenuazione complessiva di ciascun collegamento  $\bar{A}$  è ottenuta attraverso integrazione numerica di questi valori.

$$k = aR^b \left( \frac{dB}{km} \right) \quad (1)$$

Dove  $a$  and  $b$  valgono rispettivamente 0,13 e 1,02 (viene assunta polarizzazione verticale ed elevazione a  $0^\circ$  dei collegamenti) mentre  $R$  è il valore di intensità misurato su ogni pixel (mm/h).

I valori di attenuazione  $\bar{A}$  sono l'ingresso dell'algoritmo di ricostruzione tomografica dei campi di precipitazione RRA (dall'inglese *Rain Reconstruction Algorithm*). Diversi approcci sono stati sviluppati nel corso degli anni per la ricostruzione dei campi di precipitazione principalmente catalogabili in: interpolazione con metodo *kriging* o *IDW* [2][3]; ricostruzione tomografica [4][5][6], in cui rientra l'algoritmo RRA. Nello specifico, l'algoritmo consente la ricostruzione per mezzo di un numero di funzioni base (*Bases Functions* BFs) con una forma di un'esponenziale negativa, la cui espressione è nell'equazione 2, scelta poiché, da precedenti studi [7], meglio modella la distribuzione spaziale dell'intensità di precipitazione.

$$BF_i(R_m, \rho_0, X_c, Y_c) = R_m e^{\frac{-[(x-x_c)^2+(y-y_c)^2]^{1/2}}{\rho_0}} \quad (2)$$

La posizione del centro della cella,  $X_c, Y_c$ , il picco  $R_m$  e il raggio  $\rho_0$  sono parametri indipendenti determinati iterativamente in modo da minimizzare, a ciascun ciclo, la seguente funzione errore:

$$err(R_m, \rho_0, X_c, Y_c) = \sum_1^L (A_i(R_m, \rho_0, X_c, Y_c) - \bar{A}_i)^2 \quad (3)$$

Nell'equazione 3,  $L$  è il numero di collegamenti mentre  $\bar{A}_i$  e  $A_i$  sono rispettivamente i valori di attenuazione misurati dall' $i$ -esimo collegamento ottenuto dall'integrazione numerica su mappa radar e su mappa ricostruita. Quando il valore dell'errore non cambia dopo un certo numero di iterazioni, l'algoritmo ritorna la mappa finale ricostruita. La figura 2 mostra la mappa ricostruita con 6 celle partendo dalla mappa radar nella figura 1 mentre in figura 3 è riportato lo schema a blocchi dell'algoritmo.

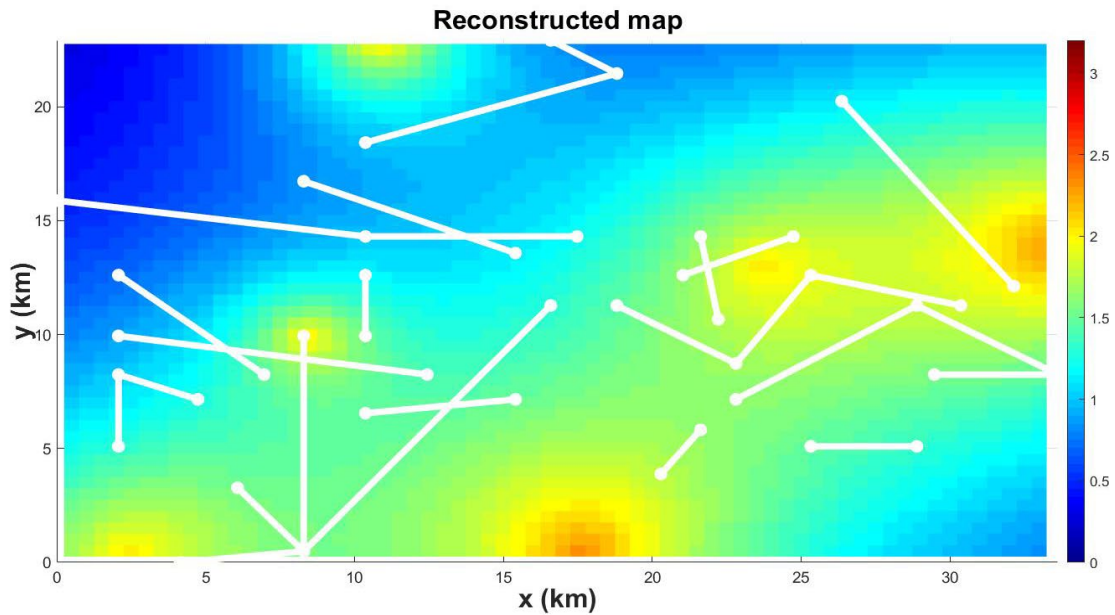


Figura 2 Ricostruzione con algoritmo RRA della mappa radar in figura 1.

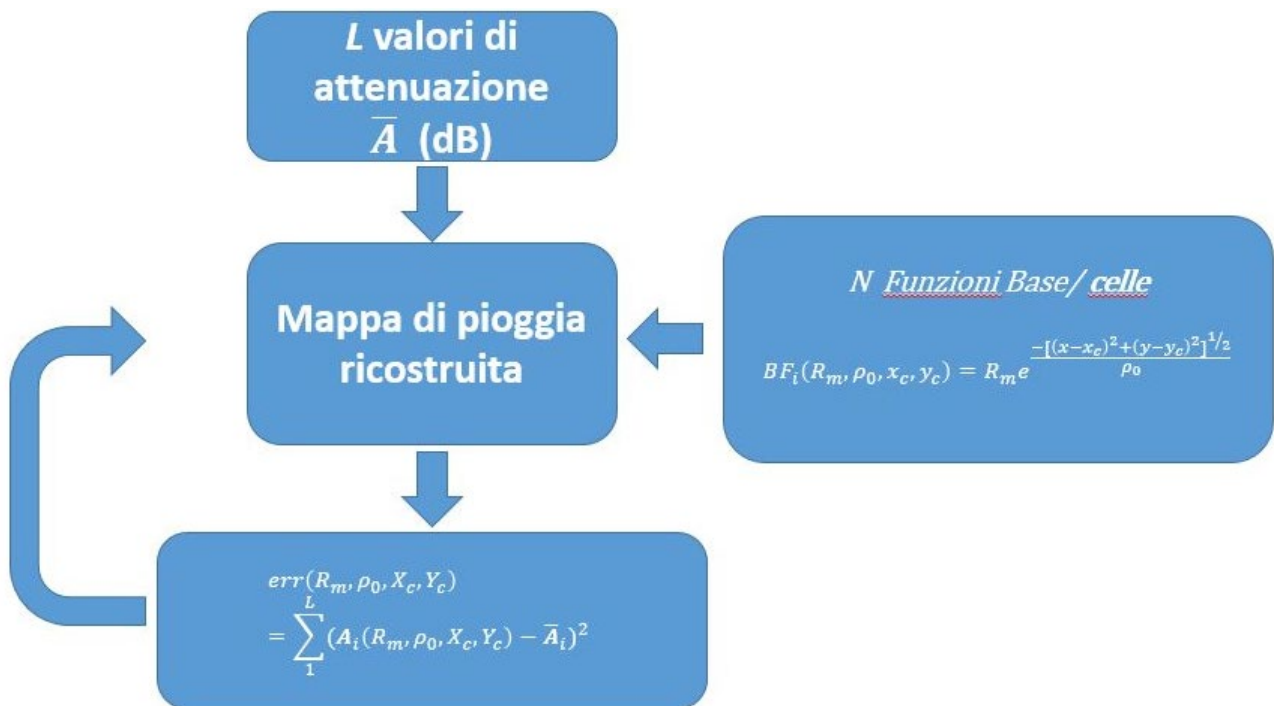


Figura 3 Schema a blocchi dell' algoritmo tomografico RRA

## Simulazioni

Considerando l'evento selezionato, l'obiettivo è di valutare la ricostruzione al variare di diversi parametri:

- Numero di celle. In questa fase iniziale sono state considerate 2, 4 e 6 celle per la ricostruzione
- Quantizzazione dei livelli di attenuazione. Facendo riferimento ai dati reali ottenuti dai collegamenti radio, anche di diversi scenari europei, è stata valutata la ricostruzione con 0,1 dB e 1 dB di quantizzazione.
- Risoluzione temporale. I risultati sono valutati considerando una serie temporale di 76 s (mappa per mappa) e di 15 minuti delle attenuazioni in ingresso all'algoritmo.



Per ciascuna simulazione viene osservata l'evoluzione dell'intensità di precipitazione mediata sull'area e il conseguente accumulo nel corso dell'evento confrontando le ricostruzioni con il riferimento ottenuto dalle mappe radar. La scelta di queste due quantità come figure di merito per valutare la bontà delle ricostruzioni risiede nel fatto che esse trovano applicazione nel modello idrologico sviluppato nel corso del progetto MOPRAM e introdotto nel *deliverable* 2.2. I primi risultati dell'applicazione dell'algoritmo per finalità idrologiche e maggiori dettagli a riguardo sono presenti nel *deliverable* 3.3.

#### Prima simulazione – Quantizzazione 0,1 dB – Risoluzione temporale: 76 s

La figura 4 mostra l'andamento dell'intensità di precipitazione mediata sull'area data dal riferimento (curva continua in blu) e dalla ricostruzione (curva tratteggiata in rosso) con 4 celle. Nonostante il comportamento "rumoroso" della ricostruzione, l'andamento medio segue abbastanza fedelmente il riferimento ottenuto dalle mappe radar. La figura 5 mostra invece l'andamento nel corso dell'evento dell'accumulo ricostruito con 2, 4 e 6 celle. Definendo  $\delta$  come la differenza percentuale tra l'accumulo alla fine dell'evento dato dal riferimento (curva blu continua) e dalle ricostruzioni, sotto sono riportati i valori dove si può notare che il miglior risultato (in valore assoluto) è dato dalla ricostruzione con 4 celle.

- $\delta_{6\text{celle}} = 10 \%$
- $\delta_{4\text{celle}} = 3 \%$
- $\delta_{2\text{celle}} = -6 \%$

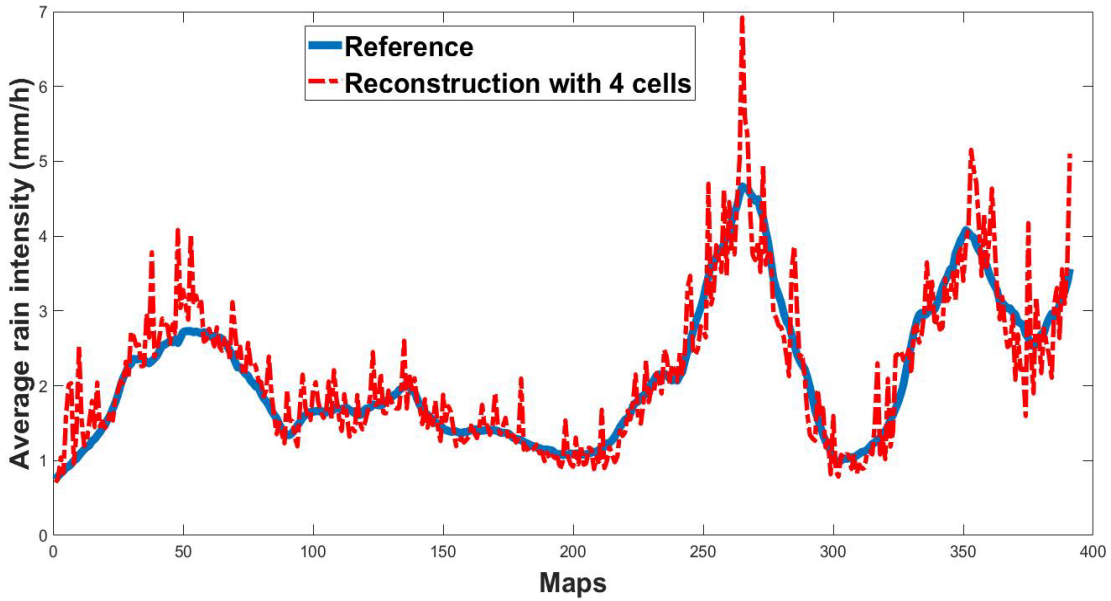


Figura 4 Intensità di precipitazione mediata sull'area ottenuta dalle mappe radar (curva continua blu) e dalla ricostruzione (curva tratteggiata in rosso) con valori di attenuazione quantizzati a 0.1 dB.

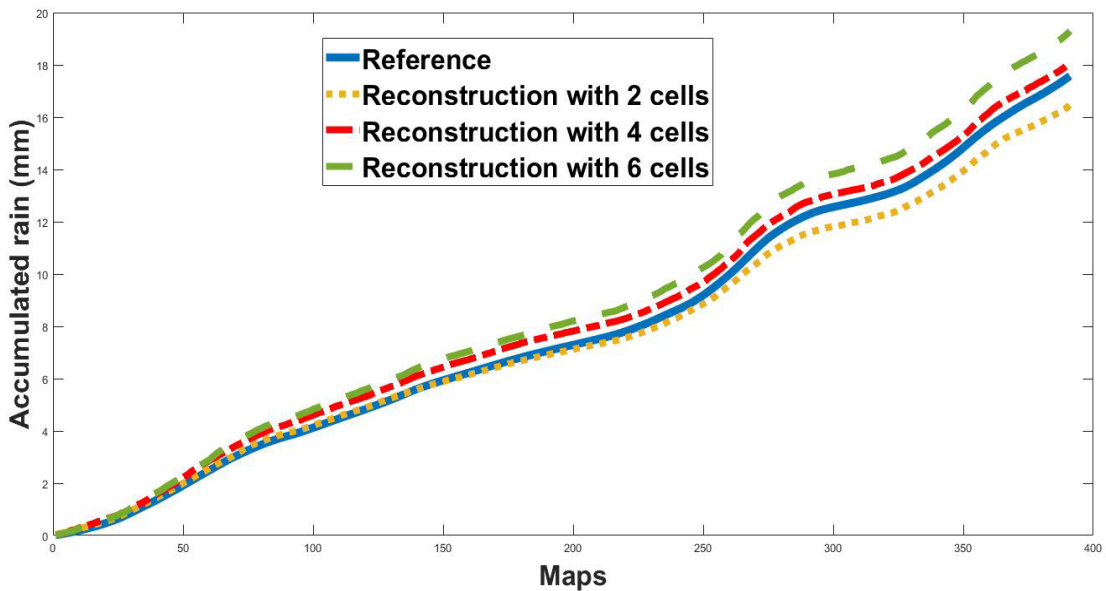


Figura 5. Accumulo di precipitazione (mediato sull'area) ottenuto dal riferimento (curva blu) e dalle ricostruzioni con 2,4 e 6 celle (curve tratteggiate) con valori di attenuazione quantizzati a 0,1 dB.

### Seconda simulazione– Quantizzazione 1 dB – Risoluzione temporale: 76 s

L'incremento della quantizzazione a 1 dB ha come effetto principale un aumento dell'errore nella stima dell'intensità di precipitazione per mezzo dell'attenuazione misurata da un collegamento radio e, conseguentemente, un effetto sulla minima intensità di precipitazione (equivalente medio sul collegamento) che è possibile rilevare,  $R_{min}$  nell'equazione 4, in quanto essa è legata alla minima attenuazione rilevabile dal collegamento,  $\frac{\Delta}{2}$  dB, dove  $\Delta$  è il passo di campionamento.

$$R_{min} = \left(\frac{\Delta}{2aL}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (4)$$

Dove  $a$  e  $b$  sono i parametri presenti nell'equazione 1 e  $L$  è la lunghezza dei collegamenti.

La figura 6 mostra come varia  $R_{min}$  con  $\Delta=1$  dB in funzione della lunghezza dei 26 collegamenti scelti per questa simulazione per due frequenze diverse: 23 GHz (usata in queste simulazioni) e 17 GHz ( $a=0,06$   $b=1,09$ ). La figura mostra come l'effetto della quantizzazione a 1 dB dell'attenuazione su  $R_{min}$  sia più significativo al diminuire della lunghezza dei collegamenti e della loro frequenza. Ulteriori esempi e considerazioni sull'effetto della quantizzazione sulla stima dell'intensità di precipitazione sono affrontate nel *deliverable* 3.1.

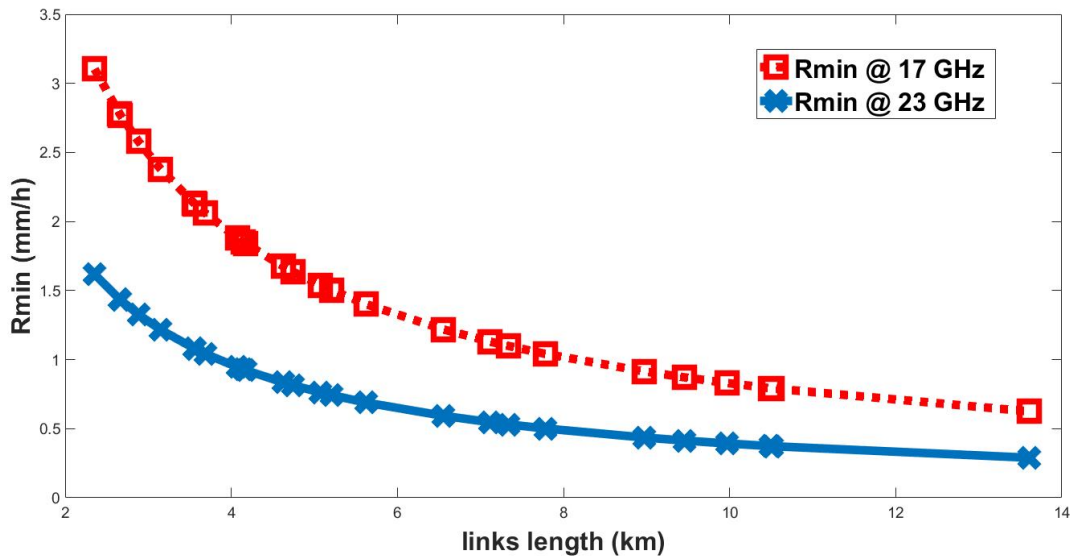


Figura 6. Intensità di precipitazione minima (uniforme) con una quantizzazione dei valori di attenuazione a 1 dB in funzione della lunghezza dei collegamenti a 23 GHz (curva continua blu) e a 17 GHz (curva rossa tratteggiata). Le X e i quadrati sono in corrispondenza della lunghezza dei 26 collegamenti usati in questo documento.

Per quanto riguarda l'effetto sull'evento selezionato l'incremento del passo di quantizzazione in figura 7 non provoca una significativa differenza sull'evoluzione dell'intensità di precipitazione rispetto alla simulazione precedente (figura 4). Osservando invece la figura 8 e i valori di  $\delta$  sotto riportati l'accumulo ottenuto dalle ricostruzioni è leggermente maggiore, a parità di celle, rispetto alla simulazione precedente in figura 3. Il miglior risultato in termine di  $\delta$  (valore assoluto) è lo stesso ottenuto in precedenza ma con un diverso numero di celle impiegate nella ricostruzione.

- $\delta_{6\text{celle}} = 14 \%$
- $\delta_{4\text{celle}} = 7 \%$
- $\delta_{2\text{celle}} = -3 \%$

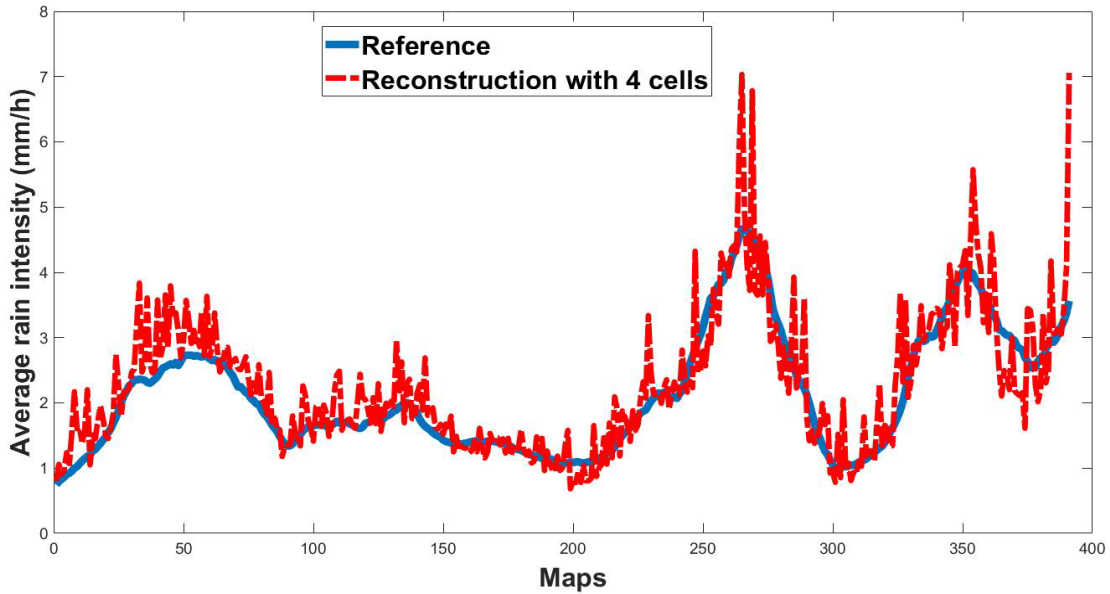


Figura 7. Intensità di precipitazione mediata sull'area ottenuta dalle mappe radar (curva continua blu) e dalla ricostruzione (curva tratteggiata in rosso) con valori di attenuazione quantizzati a 1 dB.

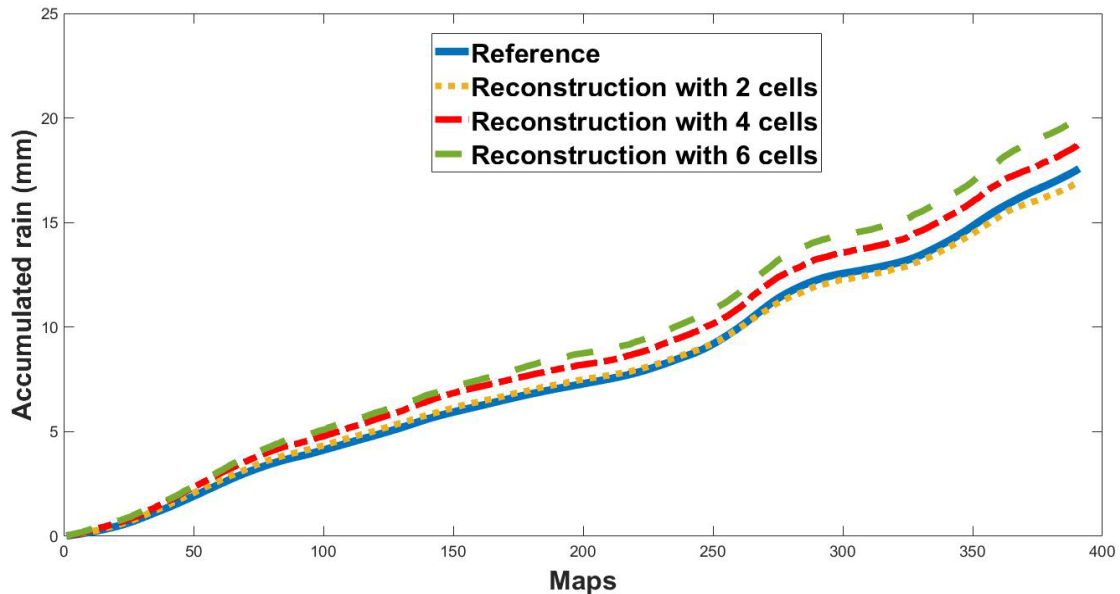


Figura 8. Accumulo di precipitazione (mediato sull'area) ottenuto dal riferimento (curva blu) e dalle ricostruzioni con 2,4 e 6 celle (curve tratteggiate) con valori di attenuazione quantizzati a 1 dB.

### Terza simulazione– Quantizzazione 1 dB – Risoluzione temporale: 15 minuti

In questa simulazione viene valutato l'effetto sulla ricostruzione avendo in ingresso il valore massimo, minimo e medio di attenuazione ogni 12 mappe (15'12"). L'obiettivo è quello di simulare la ricostruzione con i dati reali ottenuti in generale da una rete di collegamenti radio commerciali: massimo e minimo della potenza trasmessa e ricevuta in 15 minuti quantizzati a 1 dB. La figura 9 mostra il confronto tra l'accumulo ottenuto dalle mappe radar (curva blu) e dalla ricostruzione con il massimo (curva viola), minimo (curva arancione) e media tra i due (curva verde) dell'attenuazione ogni 12 mappe. Le X, i cerchi e i quadrati sulle curve ricostruite evidenziano la diversa risoluzione temporale: le mappe ricostruite sono 32, invece di 391. Come si può osservare dalla figura, il massimo dell'attenuazione in 15 minuti porta a una sovrastima dell'accumulo mentre il minimo una sottostima: queste due quantità, prese singolarmente, non sono utilizzabili per la ricostruzione tomografica poiché porterebbero a importanti differenze in termini di accumulo rispetto al riferimento. Osservando invece il valore medio, la curva ha un andamento più affine rispetto al riferimento.

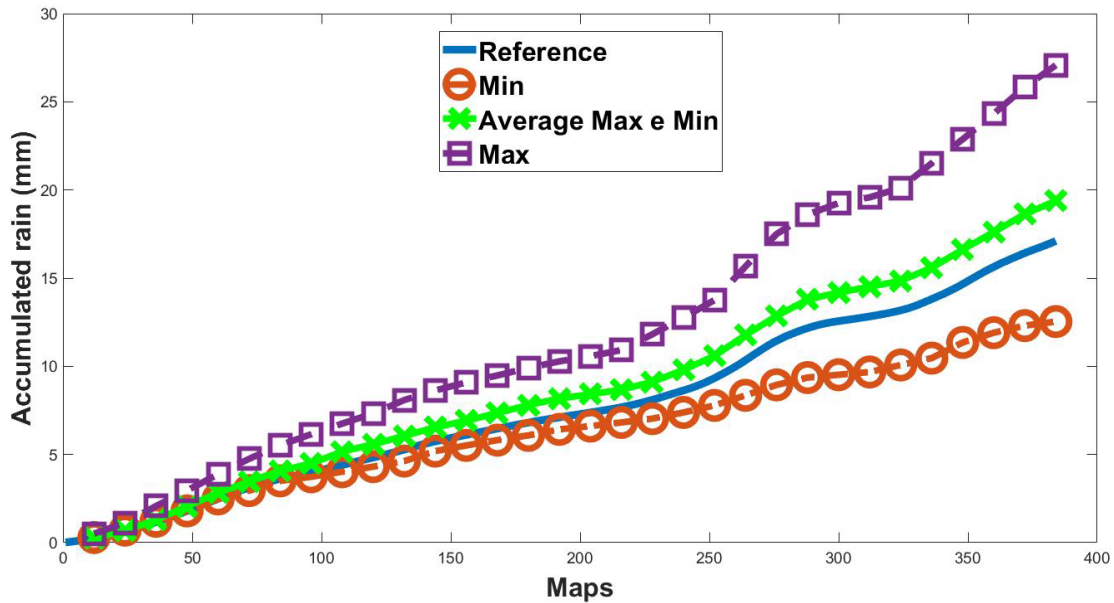


Figura 9. Accumulo di precipitazione (mediato sull'area) ottenuto dal riferimento (curva blu) e dalle ricostruzioni con 4 celle dal massimo (curva viola con quadrati), minimo (curva arancione con cerchi) e media delle attenuazioni (curva verde con X) ogni 12 mappe (circa 15').

### Valore medio dell'attenuazione ogni 15 minuti

Partendo dal risultato sopra, la figura 10 mostra l'andamento dell'intensità di precipitazione ottenuto dalla media delle attenuazioni ogni 12 mappe,  $A_{av}$  nell'equazione (2), confrontato sempre con il riferimento.

$$A_{av} = \frac{A_{max} + A_{min}}{2} \quad (2)$$

Dove  $A_{max}$  e  $A_{min}$  sono il massimo e minimo delle attenuazioni di ciascun collegamento nella finestra temporale considerata. Osservando la figura, anche in questo caso l'andamento dell'intensità ricostruita segue il riferimento, anche se le sovrastime sono piuttosto frequenti. Quest'ultima osservazione è riscontrabile anche osservando il confronto con la ricostruzione ogni 76 s (mappa per mappa) in figura 11 e porta a una ulteriore sovrastima dell'accumulo, come è possibile osservare nella figura 12, ottenendo un  $\delta=13\%$ . Questo effetto è un comportamento generale ed è dovuto a una non uniforme distribuzione dell'attenuazione misurata dai collegamenti radio in una finestra temporale di 15 minuti come spiegato nel successivo paragrafo.

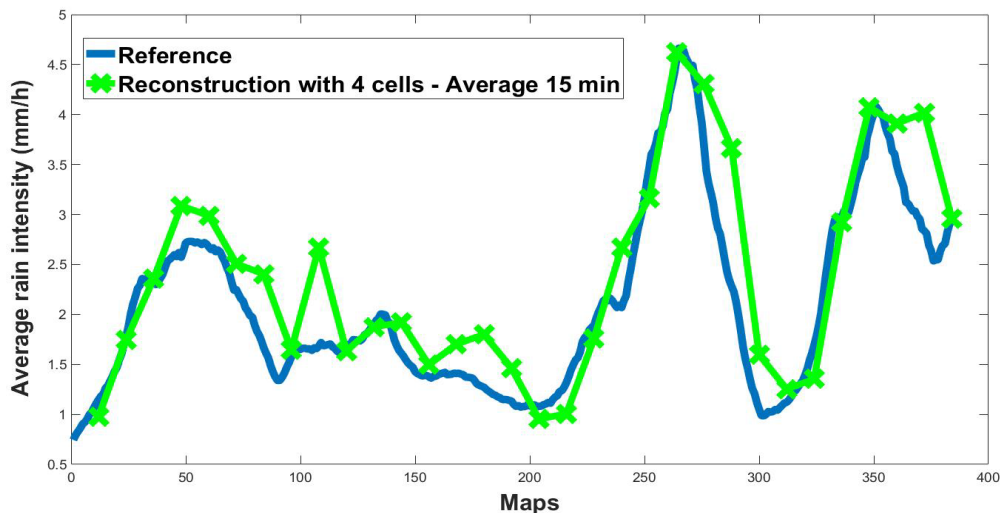


Figura 10. Intensità di precipitazione mediata sull'area ottenuta dalle mappe radar (curva continua blu) e dalla ricostruzione con i valori medi di attenuazione ogni 12 mappe (curva verde con X).



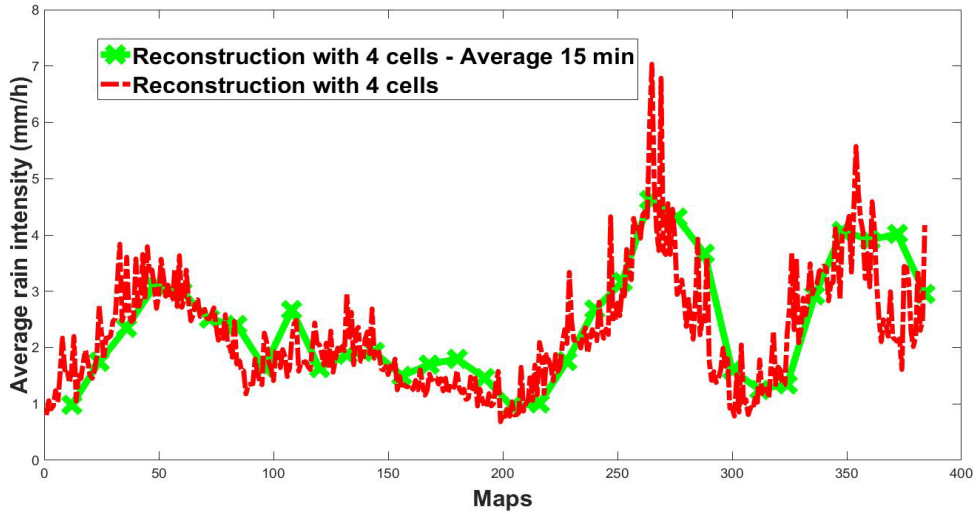


Figura 11. Intensità di precipitazione mediata sull'area ottenuta dalla ricostruzione mappa per mappa (in rosso tratteggiato) e dalla ricostruzione con i valori medi di attenuazione ogni 12 mappe (curva verde con le X).

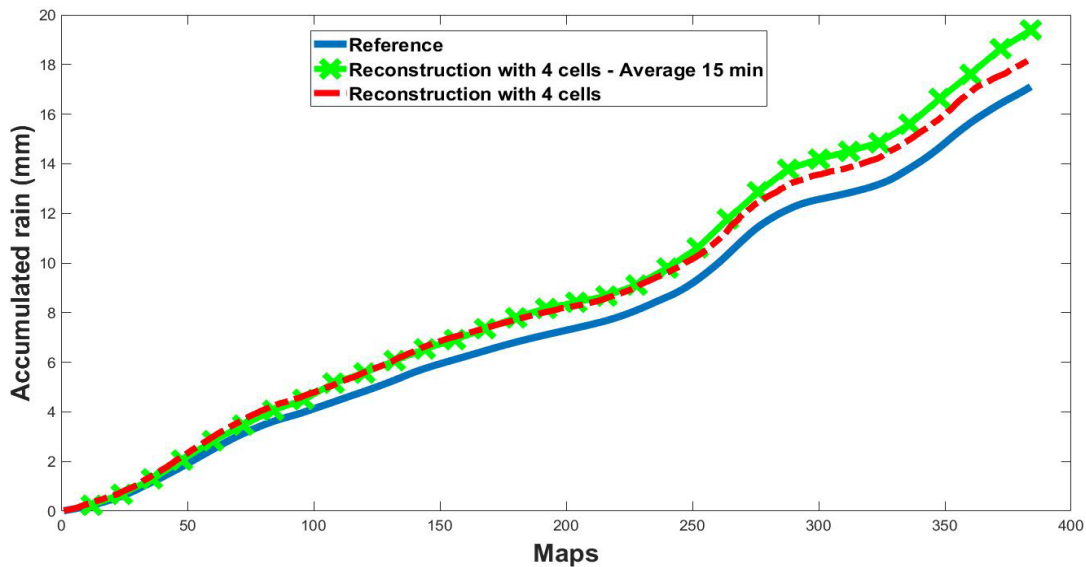


Figura 12. Accumulo di precipitazione (mediato sull'area) ottenuto dal riferimento (curva blu), dalla ricostruzione con 4 celle mappa per mappa (in rosso tratteggiato) e dalla ricostruzione con i valori medi di attenuazione ogni 12 mappe (curva verde con le X).

### Media pesata dell'attenuazione ogni 15 minuti

Avendo a disposizione delle mappe di pioggia radar con una risoluzione ogni 76 secondi è possibile fare una valutazione più precisa sulla distribuzione dell'attenuazione su un collegamento radio in una finestra temporale di 15 minuti. Prendendo spunto dall'approccio usato da Overeem et al. [2] è possibile esprimere l'attenuazione media in equazione 1 in questo modo:

$$A_{av} = \alpha A_{max} + (1 - \alpha) A_{min} \quad (3)$$

Dove per  $\alpha=0,5$  si ha l'equazione 2. A titolo d'esempio, la figura 13 mostra l'istogramma dei valori di attenuazione di un collegamento su un insieme di 12 mappe e una linea tratteggiata verticale in corrispondenza del valore di  $A_{av}$  ottenuto con  $\alpha=0,5$  (6,5 dB). Definendo quindi  $\alpha$  come il numero di elementi maggiore della media tra il massimo e il minimo, diviso il numero di mappe considerate (12), il suo valore per questo esempio è 0,33. La figura 14 mostra invece l'istogramma complessivo degli  $\alpha$  (32 x 26 campioni) ottenuti per questo evento dove si può notare che la maggior parte dei valori è inferiore a 0,5, indicato dalla linea verticale tratteggiata in rosso. Il valore medio di  $\alpha$  è 0,38, indicando quindi che le attenuazioni in una finestra temporale di 15 minuti sono (in media) inferiori al valore calcolato nell'equazione 2 e ciò spiega la sovrastima riscontrata nelle figure 10, 11 e 12. Infatti, utilizzando  $\alpha=0,38$  nell'equazione 2, la figura 15 mostra il confronto tra le intensità di precipitazione ricostruite con  $\alpha=0,5$  e  $\alpha=0,38$  dove si può notare come quest'ultima sia più fedele al riferimento. Ciò ha un effetto anche nell'accumulo in figura 16 ottenendo un  $\delta=5\%$  (rispetto a un 13% con  $\alpha=0,5$ ).

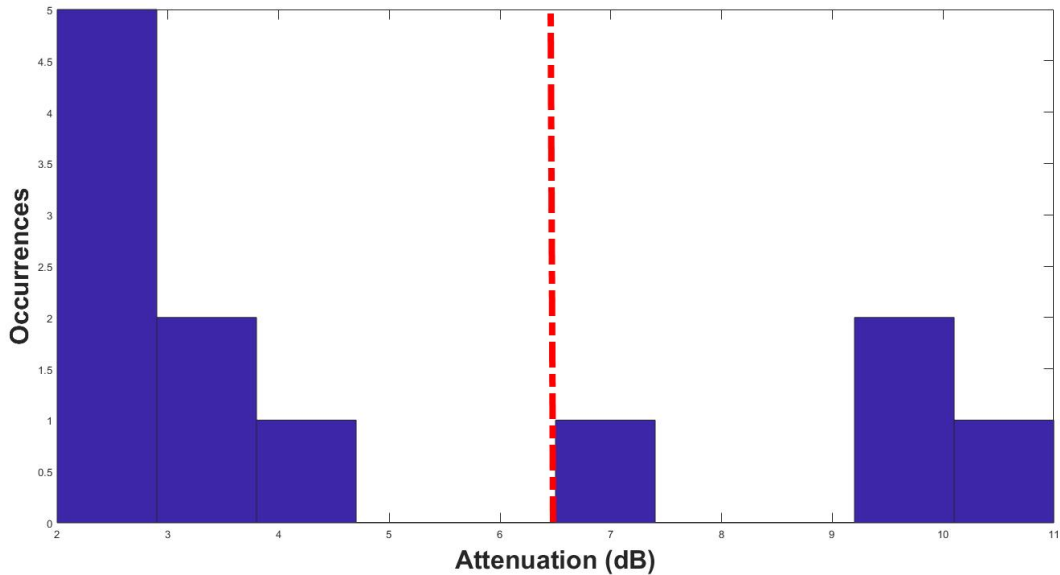


Figura 13. Istogramma dei valori di attenuazioni calcolati su 12 mappe dell'evento per un collegamento su 12 mappe dell'evento selezionato. La linea verticale tratteggiata in rosso rappresenta il valore ottenuto con  $\alpha=0,5$  (6,5 dB).

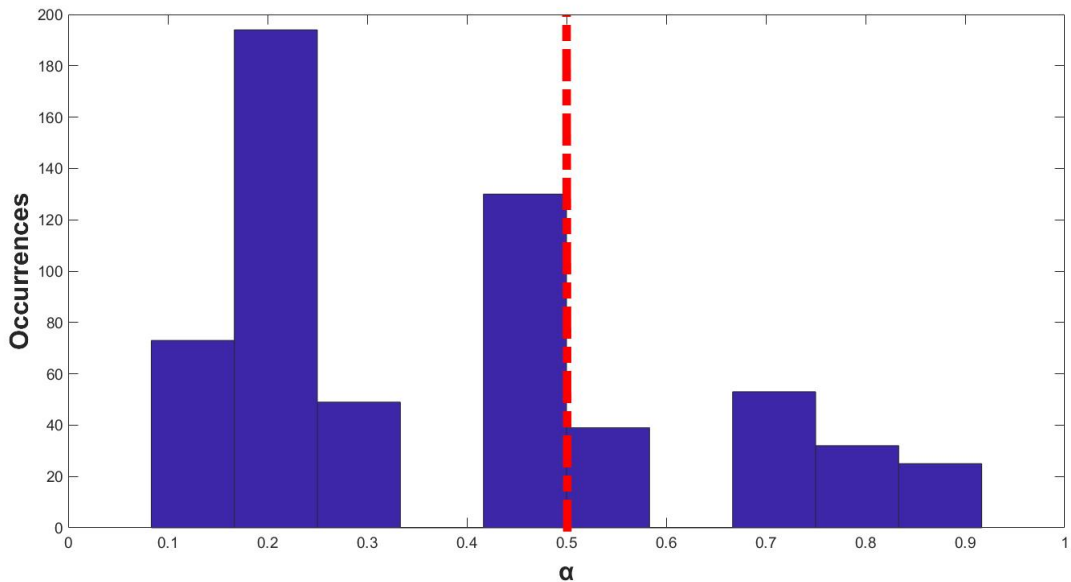


Figura 14. Istogramma dei valori di  $\alpha$  per l'evento selezionato. La maggior parte dei campioni è inferiore a  $\alpha=0,5$ , rappresentato dalla linea verticale tratteggiata in rosso.

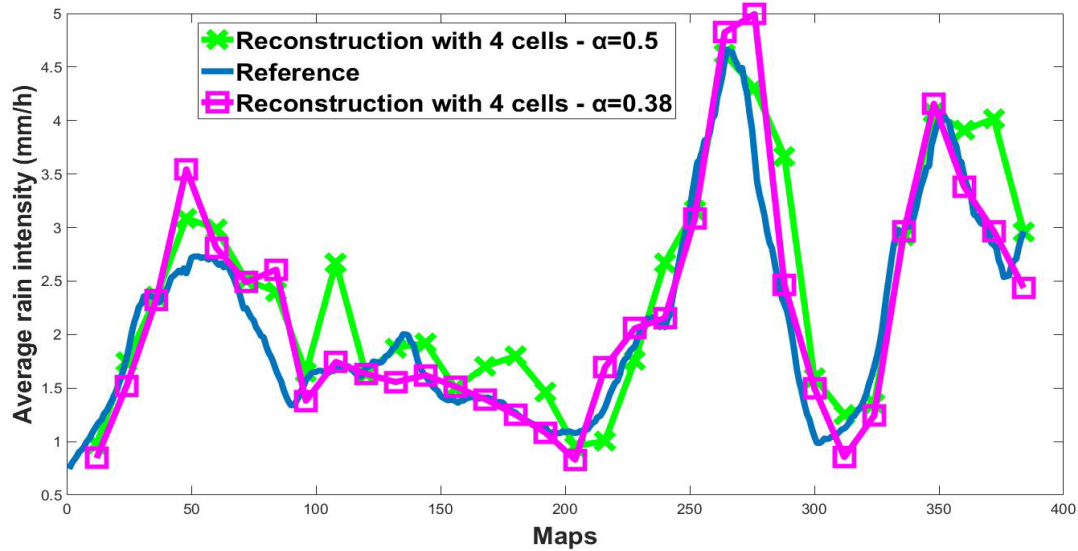


Figura 15. Intensità di precipitazione mediata sull'area ottenuta dalla ricostruzione con un valore di  $\alpha=0,5$  (curva verde con X) e con  $\alpha=0,38$  (curva viola con quadrati) confrontata con il riferimento (curva blu).

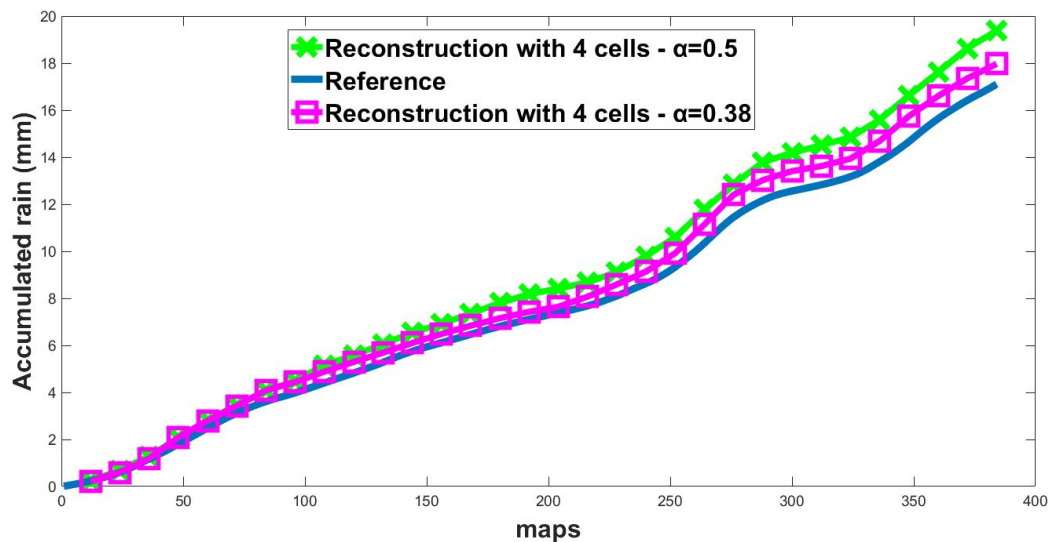


Figura 16. Accumulo ottenuto dalla ricostruzione con un valore di  $\alpha=0,5$  (curva verde) e con  $\alpha=0,38$  (curva viola) confrontata con il riferimento (curva blu).

## CONCLUSIONI

Attraverso l'analisi di una serie di mappa radar, in questo documento viene introdotto l'algoritmo di ricostruzione tomografica dei campi di precipitazione RRA valutando i risultati della ricostruzione di un evento di precipitazione simulando una diversa quantizzazione e risoluzione temporale delle attenuazioni in ingresso all'algoritmo.

Il risultato della prima simulazione, dove le attenuazioni hanno una quantizzazione di 0,1 dB e una risoluzione temporale pari a quella delle mappe radar (76 s) è che la ricostruzione dà buoni risultati in termini di intensità di precipitazione e di accumulo se confrontati con i rispettivi riferimenti. In particolare, la differenza percentuale tra i valori alla fine dell'evento tra ricostruito e riferimento variano da -6% a 10% e il miglior risultato è ottenuto con la ricostruzione con 4 celle (3 %).

Nella seconda simulazione le attenuazioni sono quantizzate a 1 dB. L'incremento della quantizzazione causa una incertezza nella stima della precipitazione media sul collegamento e, in funzione della lunghezza e frequenza dei collegamenti, una limitazione nell'identificare eventi piovosi di bassa intensità. Dai risultati di questo evento non ci sono grosse differenze rispetto alla simulazione precedente, senonché il miglior risultato in termine di accumulo ( $\delta$ ) è ottenuto con un numero di celle diverso ( $\delta=-3$  % con 2 celle).

Un primo risultato della terza simulazione è che considerare il massimo o il minimo dell'attenuazione in una finestra di 15 minuti non produce risultati affidabili in termini di accumulo. Il valore medio dei due migliora il risultato ma è comunque presente una sovrastima, anche rispetto alla ricostruzione ottenuta nella seconda simulazione. Analizzando la distribuzione dei valori di attenuazione ogni 76 secondi è possibile ottenere un fattore correttivo  $\alpha$  che migliora la stima dell'accumulo. Verrà investigato ulteriormente su diverse serie di mappe radar un valore di  $\alpha$  più generale che, anche in riferimento al valore ottenuto in [2] ( $\alpha=0,33$ ), ci aspettiamo

---

simile a quello ottenuto per questo evento. Esso verrà impiegato quando i dati dei collegamenti radio sono forniti ogni 15 minuti come valore massimo e minimo della potenza ricevuta e trasmessa (caso frequente anche per diversi scenari europei).

Dovendo scegliere un numero di celle a priori per la ricostruzione, 4 dà risultati affidabili in termini di accumulo, sebbene con piccole differenze tra diverse simulazioni, indicando questo numero ideale per la ricostruzione su un'area di dimensioni comparabili a quella analizzata e per una simile distribuzione di collegamenti.

Partendo da questi risultati preliminari, nel corso del WP4 l'algoritmo verrà implementato con dati di una rete di collegamenti radio, estraendo l'attenuazione da precipitazione con le procedure indicate nel *deliverable 3.1*, in due specifiche aree di interesse idrogeologico: Valmalenco (Sondrio) in corrispondenza del bacino del torrente Mallero e dei fiumi Lambro, Seveso e Olona, a nord di Milano. In questa fase, sarà possibile investigare ulteriormente l'effetto del numero di celle su una diversa area e distribuzione di collegamenti cercando un valore ottimo anche in funzione del diverso tipo di precipitazione (stratiforme o convettivo).



## RIFERIMENTI

[1] ITU-R 838- 3 <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>

[2] Overeem, Aart, Hidde Leijnse, and Remko Uijlenhoet. "Country-wide rainfall maps from cellular communication networks." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.8 (2013): 2741-2745

[3] O. Goldshtein, H. Messer, and A. Zinevich, "Rainrate estimation using measurements from commercialtelecommunications links," *IEEE Transactions on sig-nal processing*, vol. 57, no. 4, pp. 1616–1625, 2009, IEEE.

[4] D. Giuli, A. Toccafondi, G. B. Gentili, and A. Freni, "Tomographic reconstruction of rainfall fields throughmicrowave attenuation measurements," *Journal of ap-plied meteorology*, vol. 30, no. 9, pp. 1323–1340, 1991.

[5] Fabrizio Cuccoli, Luca Facheris, Stefano Gori, and LucaBaldini, "Retrieving rainfall fields through tomographicprocessing applied to radio base network signals," *Proc.SPIE*, vol. 8174, pp. 81740C–81740C, 2011.

[6] A. Zinevich, P. Alpert, and H. Messer, "Estimation ofrainfall fields using commercial microwave communi-cation networks of variable density," *Advances in waterresources*, vol. 31, no. 11, pp. 1470–1480, 2008, Else-vier.

[7] C. Capsoni and L. Luini, "Analysis of the spatial and temporal properties of rain cells for rainfall modelling purposes," *Italian Journal of Remote Sensing*, vol. 41,no. 3, pp. 51–62, 2009.