

# *Stima del ritardo di fase introdotto dall'atmosfera negli interferogrammi sar al fine di migliorare le previsioni meteorologiche*

## **1. Introduzione**

Il telerilevamento è una tecnica che permette di acquisire informazioni su oggetti o fenomeni senza entrare fisicamente in contatto con essi. Viene utilizzata in numerosi campi, tra cui geografia, oceanografia, geologia ed altre discipline correlate all'Osservazione della Terra. Il radar ad apertura sintetica o SAR (*Synthetic Aperture Radar*) è un sensore a microonde attivo e coerente usato estensivamente nel telerilevamento da più di 30 anni, poiché è in grado di produrre immagini ad alta risoluzione indipendentemente dalle condizioni meteorologiche, dal giorno e dalla notte (DELL'ACQUA, 2012).

Il funzionamento di questo sensore si basa sulla combinazione coerente ed ordinata di tutti gli impulsi elettromagnetici trasmessi verso la Terra e retrodiffusi verso il satellite dalla superficie stessa, al fine di generare immagini ad alta risoluzione anche nella direzione parallela alla traccia del satellite. L'impulso trasmesso dall'antenna a bordo del satellite, infatti, interagisce con la superficie terrestre e solo una parte di esso è retrodiffusa verso il sistema ricevente. La porzione di segnale ricevuta dal sensore viene poi elaborata in maniera coerente, tenendo in considerazione sia l'ampiezza che la fase del segnale, insieme agli altri impulsi. La profondità di penetrazione e

tutti gli effetti correlati alla propagazione (ad esempio, perdite nella propagazione, interazioni ionosferiche, fenomeni di assorbimento, ecc.) dipendono dalla frequenza operativa del sistema trasmittente (MOREIRA *et al.*, 2013). L'immagine così ottenuta è formata dalla misura di ampiezza e fase della radiazione retrodiffusa dalla superficie e dipende da una grande varietà di fattori come il tipo, la forma e l'orientamento degli elementi riflettenti, nonché dalle loro proprietà fisiche ed elettromagnetiche. La qualità dell'immagine, oltre che dalle proprietà elettromagnetiche dell'area illuminata, dipende anche dalla geometria di puntamento del sistema, nonché dalla topografia del terreno sorvolato (FERRETTI *et al.*, 2007).

Tra le varie tecniche sviluppate per un uso avanzato dei dati SAR, c'è l'interferometria (InSAR) che permette la rilevazione ed il monitoraggio di numerosi fenomeni geofisici (ALPERS *et al.*, 1981; BOUMAN *et al.*, 1990; BAMLER, HARTL, 1998; MASSONNET, FEIGL, 1998; ROSEN *et al.*, 2000) andando a valutare la differenza di fase tra due o più immagini acquisite sulla stessa area in momenti diversi, oppure nello stesso momento, ma da posizioni differenti. Se un punto sulla superficie si muove, infatti, la distanza tra il punto stesso ed il sensore cambia tra le varie acquisizioni, e questo si traduce in una variazione nella fase registrata dal sistema ricevente. Questa misura viene general-

mente affetta da numerosi errori: inaccurately geometriche, effetti di decorrelazione spaziale e/o temporale, errori di elaborazione ed errori dovuti all'atmosfera (PIERDICCA *et al.*, 2020). Quest'ultimo in particolare introduce una ulteriore differenza nella fase del segnale, generalmente definita come schermo di fase atmosferico (APS, dall'inglese *Atmospheric Phase Screen*) o ritardo di fase (*STD Slant Total Delay* o *ZTD Zenith Total Delay*, dipendentemente dalla direzione di valutazione del ritardo, rispettivamente lungo la congiungente punto a Terra-satellite o in direzione zenitale). La differenza è dovuta a variazioni nella composizione della troposfera che introduce una variazione nella traiettoria percorsa dal segnale (i.e. rifrazione) e modifica quindi la sua velocità, introducendo un ritardo non noto.

Nonostante venga generalmente considerato una fonte di errore, l'APS può essere convertito in una informazione molto utile in meteorologia, se nell'area interessata non si è verificata una deformazione del suolo (oppure se quest'ultima è correttamente modellabile) (PIERDICCA *et al.*, 2020) e se è disponibile un modello digitale del terreno (*Digital Elevation Model*, DEM) sufficientemente accurato per poter rimuovere la componente topografica dal segnale (ottenendo un interferogramma differenziale o D-InSAR). Il ritardo atmosferico è infatti la principale fonte di errore nelle previsioni a breve termine (0-24h) delle precipitazioni. L'utilizzo del dato interfero-

metrico in ambito meteorologico è quindi abbastanza diffuso, grazie alla possibilità di ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale e temporale del ritardo di fase, in qualsiasi condizione meteorologica, indipendentemente dal giorno e dalla notte e con una migliore copertura spaziale rispetto alle tecniche di rilevamento comunemente utilizzate in questo ambito (radiosonde, ricevitori GNSS e radiometri a microonde). Numerosi sono i lavori in letteratura che hanno valutato l'effetto dell'assimilazione dello ZTD da SAR all'interno di modelli numerici previsionali a media scala (PIERDICCA *et al.*, 2020, PICHELLI *et al.*, 2010, 2015, MATEUS *et al.*, 2013, 2016, 2017, ALSHAWAF *et al.*, 2015, CHANG *et al.*, 2016, TANG *et al.*, 2016).

Lo scopo di questo lavoro è quello di descrivere il processo di elaborazione di una serie di immagini SAR per ottenere mappe differenziali ed assolute di STD e ZTD da poter assimilare all'interno di modelli numerici di previsione. Tutte le analisi e le elaborazioni di seguito descritte sono parte di un progetto di ricerca cofinanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) nel contesto del progetto SINERGY (*Synthetic Aperture Instrument for Novel Earth Remote-sensed Meteorology and Hydrology*) (PIERDICCA *et al.*, 2020), volto a valutare l'impatto dell'assimilazione di dati SAR e GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) all'interno di un modello numerico di previsione meteorologia a media scala.

## 2. Materiali e metodi

### *Effetti dell'atmosfera sugli interferogrammi SAR*

L'atmosfera, a causa della sua elevata variabilità spaziale e temporale introduce un ritardo non noto sul segnale elettromagnetico propagato. Questo ritardo si traduce, per effetto della rifrazione ad opera della ionosfera e della troposfera, in una variazione della traiettoria del segnale. L'eccesso di percorso così compiuto dipende quindi dall'indice di rifrazione e può essere espresso come segue:

$$S = \int_0^H (n - 1)dh = \int_0^H Ndh \quad (1)$$

Dove  $N$  rappresenta la rifrattività. Per quanto riguarda il sensore SAR utilizzato nell'ambito di questo lavoro, operante in banda C, come descritto nel seguito, la variabilità dell'APS è essenzialmente dovuta alla troposfera, ossia allo strato più basso dell'atmosfera, esteso dalla superficie terrestre fino a 15 km di altezza. Con le dovute approssimazioni e semplificazioni la rifrattività può essere espressa come contributo di due termini dovuti rispettivamente alla presenza di gas secchi e di vapore acqueo in troposfera:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + \left( k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) \quad (2)$$

Dove  $k_1 = 77.6 \text{ K hPa}^{-1}$ ,  $k_2 = 23.3 \text{ K hPa}^{-1}$ ,  $k_3 = 3.5 \cdot 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ ,  $P_d$  è la pressione parziale di aria secca espressa in hPa,  $T$  è la temperatura espressa in °K ed  $e$  è la pressione parziale di aria umida, espressa in hPa.

L'eccesso di percorso misurato dal SAR è quindi dato dall'integrazione della rifrattività lungo la linea di vista del satellite.

Per gli scopi del progetto si è scelto di elaborare le immagini SAR disponibili sull'area di interesse con una tecnica multi-temporale.  $M+1$  immagini SAR sono state opportunamente combinate per ottenere una serie temporale di  $M$  fasi interferometriche. Indipendentemente dalla tecnica utilizzata, ogni elemento della serie temporale rappresenta una doppia differenza, ossia la canonica differenza di fase tra l' $n$ -esima acquisizione (immagine *slave*) e l'immagine di riferimento (detta comunemente immagine *master*) e una differenza spaziale poiché tutte le misurazioni sono riferite alla fase di un punto di riferimento di coordinate  $x_0, r_0$ , scelto arbitrariamente all'interno dell'immagine *master*. In definitiva, la fase interferometrica relativa all' $n$ -esima immagine *slave* e la *master*, nel sistema di coordinate range-azimut, risulta (PIERDICCA *et al.*, 2020):

$$\psi_n(r, x) = \varphi_n(r, x) - \varphi_m(r, x) - [\varphi_n(r_0, x_0) - \varphi_m(r_0, x_0)] \quad n = 1, \dots, M \quad (3)$$

La fase  $\psi$  è la misura di ciò che è accessibile tramite la tecnica interferometrica ed è generalmente definite dal contributo di più termini

$$\psi_n(r, x) = \Delta\phi_{\text{displ}}(r, x) + \Delta\phi_{\text{topo}}(r, x) + \Delta\phi_{\text{flat}}(r, x) + \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta L_{\text{atmo}}(r, x) + c_n + v(r, x)] \quad (4)$$

Dove  $\Delta\phi_{\text{displ}}$  lo spostamento a terra, generalmente non presente negli studi atmosferici o comunque facilmente modellabile e in modo da rimuoverlo,  $\Delta\phi_{\text{topo}}$  il termine legato alla topografia,  $\Delta\phi_{\text{flat}}$  il contributo di "Terra piatta", dovuto alla curvatura della superficie terrestre,  $\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L_{\text{atmo}}$  il vero e proprio contributo dovuto all'interazione tra il segnale e l'atmosfera,  $\frac{4\pi}{\lambda} [c_n + v(r, x)]$  rispettivamente bias dovuti ad errori di stima dell'orbita del satellite e rumore residuo.

Una volta rimossi i contributi indesiderati, ciò che rimane è il valore dell'APS tra l' $n$ -esima immagine *slave* e la sua *master*. È importante ricordare che tutte le misure effettuate dal SAR, a causa della sua intrinseca geometria di osservazione laterale, sono riferite ad una linea di vista inclinata (inclinazione compresa tra i 35° e i 45° alla latitudine dell'area di interesse) e non verticale.

Per gli scopi descritti in questo lavoro il dato SAR così ottenuto, per essere assimilato nel modello meteorologico, è stato successivamente calibrato con le relative stime di ZTD da GNSS e reso una misura assoluta, mediante la metodologia descritta in PIERDICCA *et al.* (2020).

### Casi studio

Lo studio è stato condotto in Pianura Padana, area prevalentemente pianeggiante scelta appositamente in questo contesto al fine di minimizzare l'effetto della correlazione tra atmosfera stratificata e topografia negli interferogrammi. In quest'area, sono stati identificati due eventi piovosi verificatisi rispettivamente il 27 aprile 2015 e l'11 novembre 2016, come evidenziato nelle figure sottostanti.

Entrambi gli eventi si sono verificati non troppo lontani temporalmente dal passaggio del satellite, in maniera da rendere il più coerente ed affidabile possibile l'analisi.

### Sentinel-1: dati ed elaborazione

Sono state selezionate 126 immagini SAR

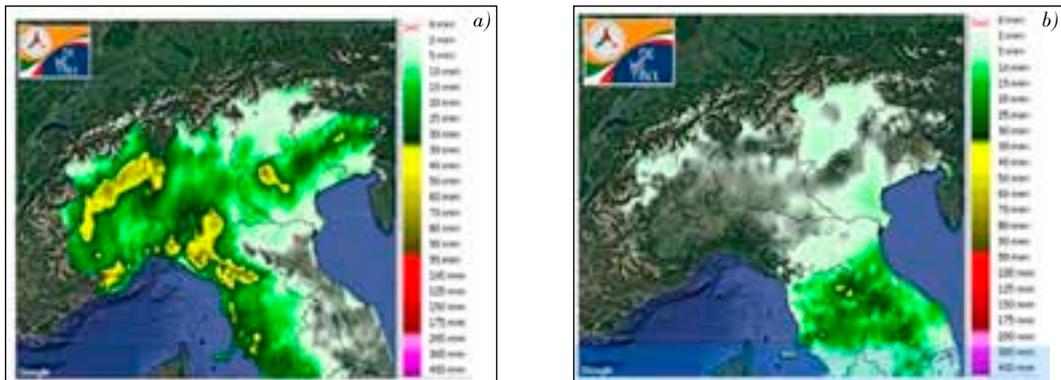


Figura 1 – Mappa delle precipitazioni accumulate nelle 12 ore successive all’evento sotto esame dalle 06UTC alle 18UTC del 27 aprile 2015 (a) e dalle 06UTC alle 18UTC dell’11 novembre 2016. Fonte piattaforma DEWETRA, per gentile concessione del Dipartimento di Protezione Civile Italiano.

da Sentinel-1 nel periodo compreso tra marzo 2015 e marzo 2017 in modalità IW (*Interferometric Wide Swath*). Sentinel-1 è una missione spaziale dell’Agenzia Spaziale Europea ESA inerita all’interno del programma Copernicus, costituita da due satelliti, Sentinel-1A e Sentinel-1B, entrambi operanti in banda C (frequenza centrale pari a 5.6 GHz). Tutte le immagini sono state selezionate lungo l’orbita discendente 168, su due frame contigue, definite rispettivamente N2 ed N3, come mostrato in figura.

Come detto in precedenza le immagini sono state elaborate adottando una tecnica multi-temporale e specificamente la tecnica SBAS (*Small Baseline Subset*) (BERARDINO *et al.*, 2002) che genera interferogrammi puntando a minimizzare la decorrelazione spaziale e temporale della serie. Questo metodo calcola le serie temporali di deformazione e la componente topografica residua utilizzando la tecnica di decomposizione ai valori singolari, (SVD), dall’inglese *Singular Value Decomposition*). Questa tecnica preserva i requisiti di correlazione spaziale e temporale di un approccio interferometrico standard, scegliendo solo gli interferogrammi caratterizzati da una *baseline* (i.e. la distanza tra le posizioni di osservazione del satellite relative alle varie acquisizioni) relativamente piccola.

In totale sono stati generati 145 interferogrammi per il frame N2 e 164 per il frame N3, con un tempo di rivisita medio di 12 giorni.

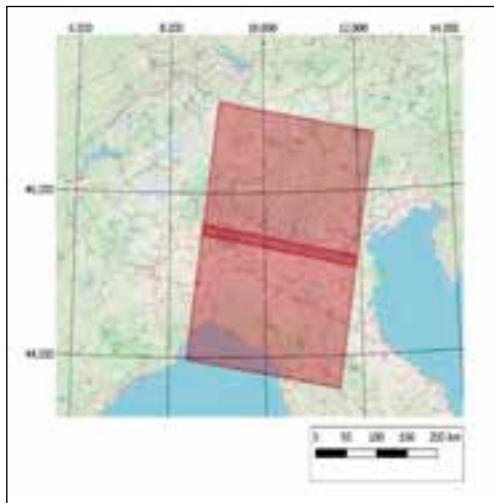


Figura 2 – Frame SAR selezionate per questo lavoro. Entrambe le immagini si riferiscono all’orbita discendente 168 della costellazione di satelliti Sentinel-1.

Tutte le immagini sono state mediate spazialmente con una tecnica detta *multilooking* volta a ridurre un particolare tipo di rumore detto *speckle* (MURALI *et al.*, 2013) ottenendo immagini ad una risoluzione di 70 x 70 m. Lo *speckle* è un particolare tipo di disturbo dovuto alla sovrapposizione del segnale riflesso da molti oggetti riflettenti contenuti all’interno di una stessa cella di risoluzione, caratterizzati da dimensioni più piccole rispetto alla lunghezza d’onda operativa. La tecnica del *mul-*

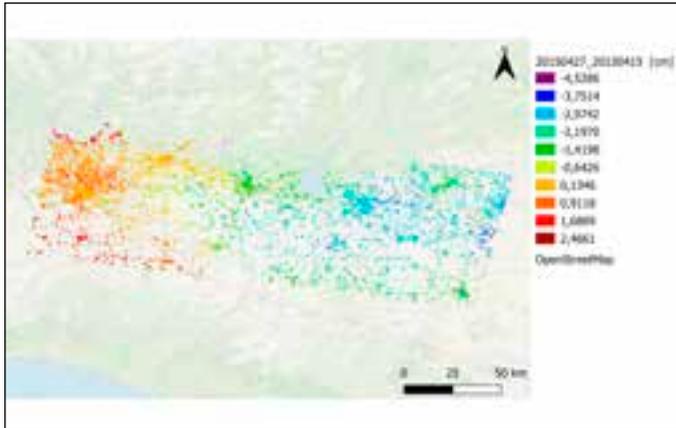


Figura 3 – Interferogramma differenziale dell'area studio relativa alla coppia master-slave 27/04/2015-15/04/2015 delle 05:27 UTC.

*tilooking* permette di eliminare o perlomeno mitigare questo effetto, a scapito della riduzione della risoluzione radiometrica dell'immagine.

Un esempio di interferogramma ottenuto nell'ambito di questa ricerca è riportato nella figura 3.

#### *Il modello numerico di previsione Weather Research and Forecasting WRF*

I modelli numerici di previsione sono oggi uno strumento essenziale per comprendere e prevedere le dinamiche atmosferiche. La loro affidabilità negli ultimi anni è aumentata, soprattutto con l'introduzione di modelli numerici ad alta risoluzione. Una previsione affidabile è un supporto decisionale essenziale per la diramazione tempestiva dell'allerta da parte della Protezione Civile in caso di rischio idrogeologico dovuto a forti precipitazioni. Sebbene la descrizione della fase di modellizzazione degli eventi non sia parte dello scopo di questo lavoro, è interessante in ogni caso osservare gli output del modello utilizzato. In questo contesto, è stato utilizzato il modello numerico non idrostatico Weather Research and Forecasting (WRF). Si tratta di un modello meteorologico a media scala a equazioni primitive con coordinate verticali che seguono l'andamento del terreno. È stata utilizzata una configurazione a tre domini annidati

a due vie: un dominio di 9 km denominato D01, inizializzato utilizzando le analisi dell'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) a  $0.125^\circ$  di risoluzione orizzontale; un dominio più interno denominato D02, con una risoluzione pari a 3 km e un dominio a più alta risoluzione di 1 km (D03) che copre l'area di interesse (Pianura Padana) dove sono disponibili i frame SAR. Tutti i domini sono caratterizzati 40 livelli verticali non equispaziati (partendo dalla superficie e arrivando fino a

100 hPa) su cui sono calcolati gli output del modello, ossia le caratteristiche chimico-fisiche dell'atmosfera a partire dalle quali è possibile calcolare i ritardi di fase. Per ulteriori approfondimenti si rimanda a (PIERDICCA *et al.*, 2020, WRF Website).

Nell'ambito di questo lavoro sono state fatte due analisi principali con i dati WRF:

1. Le variabili di uscita del modello sono state considerate come input di un algoritmo in grado di valutare il campo di rifrattività  $N$  sul volume a 40 livelli sopra descritto. Una volta stimato il campo, viene valutato l'integrale della rifrattività sia sulla verticale (ottenendo lo ZTD), che lungo la linea di vista del SAR (ottenendo la mappa di STD). Lo ZTD così calcolato viene poi utilizzato in fase di analisi e validazione e per ottenere la mappa ZTD assoluta dall'APS differenziale da SAR.
2. Un'assimilazione variazionale all'interno di WRF dei dati SAR viene eseguita al fine di produrre una stima ottimale dello stato atmosferico, fornendo le condizioni iniziali del modello con una migliore risoluzione ed accuratezza. I risultati delle previsioni con diverse assimilazioni vengono poi confrontati con le osservazioni cumulative delle precipitazioni e i dati pluviometrici, al fine di valutare l'affidabilità dei sensori assimilati.

Per quanto riguarda le mappe di ZTD dalle uscite del modello WRF, facendo riferimento alla seguente espressione

$$ZTD = \int_{z_{surf}}^{z_{top}} N(z) dz = \int_{z_{surf}}^{z_{top}} \left[ k_1 R_d \rho(z) + k_2 R_w \rho_w(z) + k_3 \frac{\rho_w(z)}{T(z)} R_w \right] dz \quad (5)$$

Si calcola l'eccesso di percorso integrando, come detto in precedenza, le variabili di output del modello su tutti i 40 livelli, ottenendo delle mappe ad 1 km di risoluzione come quelle riportate in Figura 4.

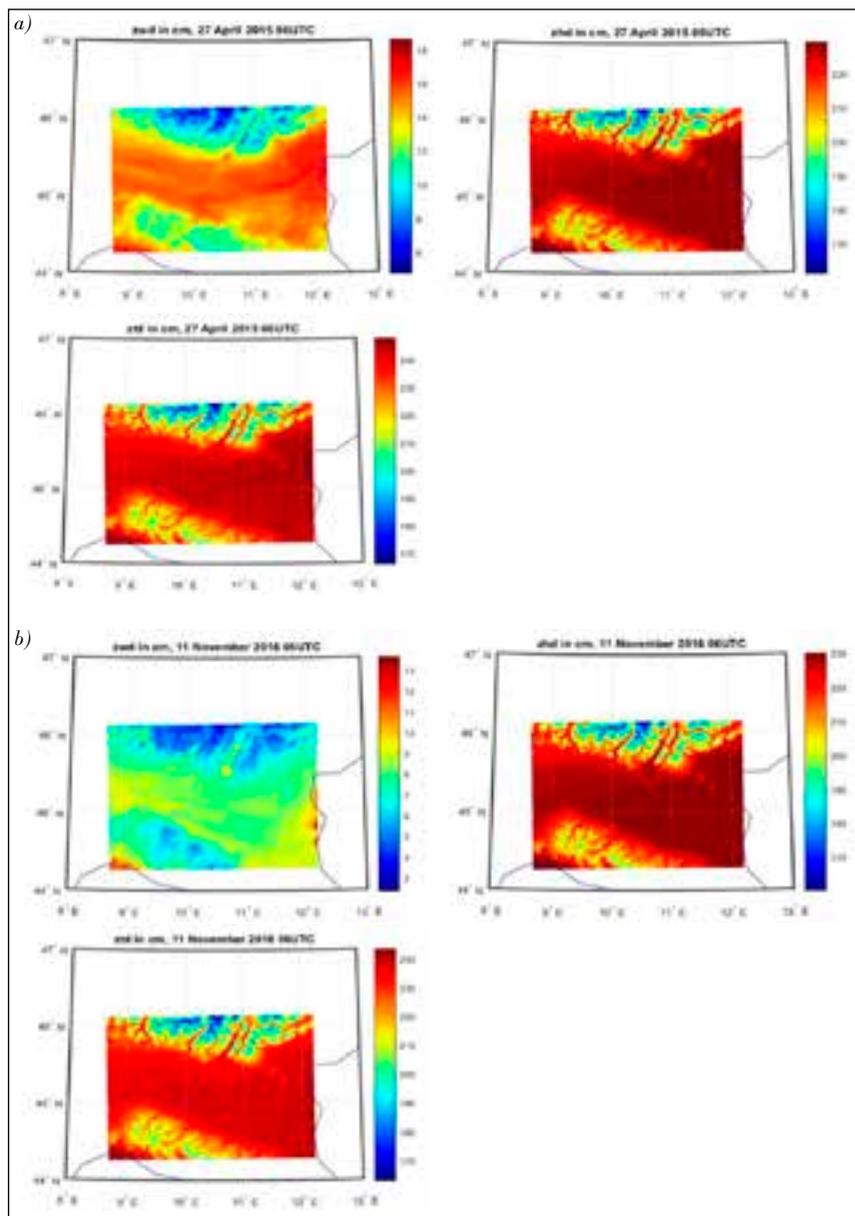


Figura 4 – Mappe di ZWD, ZHD e ZTD ottenute a partire dalle uscite del modello numerico WRF per i due eventi, uno avvenuto il 27 aprile 2015 (a) e uno avvenuto l'11 novembre 2016 (b). Le mappe sono state ottenute integrando sui 40 livelli verticali del modello, il campo tridimensionale descrittivo dello stato dell'atmosfera.

Come già detto, lo scopo principale del progetto SINERGY riguarda l'assimilazione di dati ancillari forniti e stimati da sensori SAR e GNSS rispettivamente, all'interno del modello WRF, per migliorare la previsione delle precipitazioni. L'assimilazione dei dati è la procedura attraverso cui le osservazioni (i.e. interferogramma SAR o ZTD da rete GNSS) vengono opportunamente combinate con un prodotto del modello numerico e con le loro rispettive statistiche di errore per ottenere una stima dello stato atmosferico (detta anche analisi) (PIERDICCIA *et al.*, 2020). Un approccio per assimilare i dati è l'assimilazione variazionale che migliora la stima effettuata, minimizzando iterativamente una funzione costo, ottenuta dalle differenze tra analisi e osservazioni e dai loro relativi errori associati (BARINDELLI, *et al.* 2018).

### 3. Risultati

#### SAR E WRF: Osservazioni e modello a confronto

L'obiettivo finale dell'elaborazione dei dati InSAR nell'ambito di questo lavoro è quello di migliorare le condizioni iniziali del modello WRF attraverso la loro assimilazione nel modello stesso. Come già detto in precedenza, l'APS da SAR necessita di una ulteriore fase di elaborazione per calibrare correttamente il dato eliminando eventuali effetti indesiderati dovuti ad errori orbitali e convertendo la misura da differenziale ad assoluta.

In questa sezione è riportata la versione assimilata dello STD valutata dal modello WRF contenente i dati SAR (chiamata *WRF\_SAR*) relativa al primo evento (27 aprile 2015). La mappa del ritardo troposferico è stata calcolata nella direzione della linea di vista del satellite, attraverso la seguente relazione:

$$STD_{stant} = \iiint_V N(x, y, z) \frac{z}{UP} dx dy dz \quad (6)$$

Valori negativi in mappa rappresentano una minor concentrazione di vapore acqueo nell'immagine slave (in questo caso acquisita il 9 maggio 2015) rispetto a quanto osservabile nell'immagine master (27 aprile 2015).

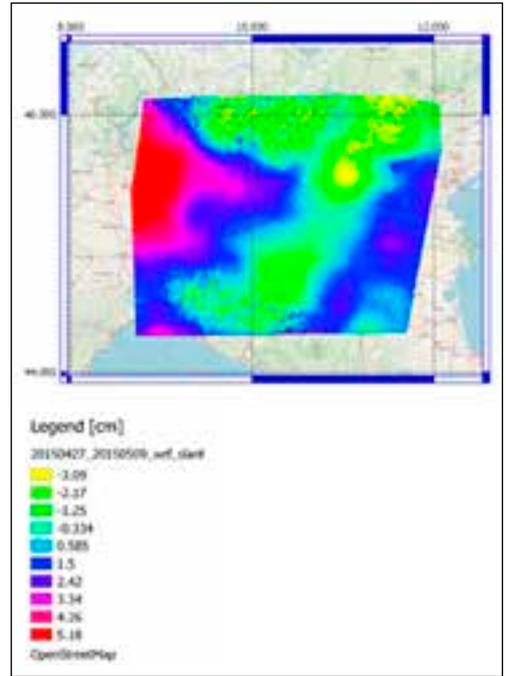


Figura 5 – Mappa dell'APS SAR per la coppia interferometrica 27/04/2015-09/05/2015.

#### Risultati Finali

Al fine di valutare gli effetti dell'assimilazione dei dati nel modello NWP, una simulazione (di seguito denominata *WRF\_CTRL*) senza alcuna assimilazione dei dati è stata eseguita dalle 00.00 UTC dei giorni in cui si è verificato l'evento sotto osservazione, alle 00.00 UTC del giorno successivo. L'orario è stato scelto per riprodurre le condizioni tipiche di una previsione reale, dove le condizioni iniziali sono disponibili alle 00.00 o alle 12.00 UTC. Ovviamente, l'ora di inizio è stata scelta tenendo conto del tempo di passaggio del SAR (cioè intorno alle 05.27 UTC). In questo modo, la simulazione è in grado di fornire il campo di ZTD iniziale alle 06.00 UTC che, a sua volta, è stato selezionato come il cosiddetto tempo di analisi (PIERDICCIA *et al.*, 2020) (cioè il tempo selezionato per l'assimilazione delle osservazioni SAR, producendo il campo assimilato *WRF\_SAR*).

Una volta assimilati nel modello anche i dati SAR quindi, le previsioni ottenute vengono confrontate visivamente con le mappe di

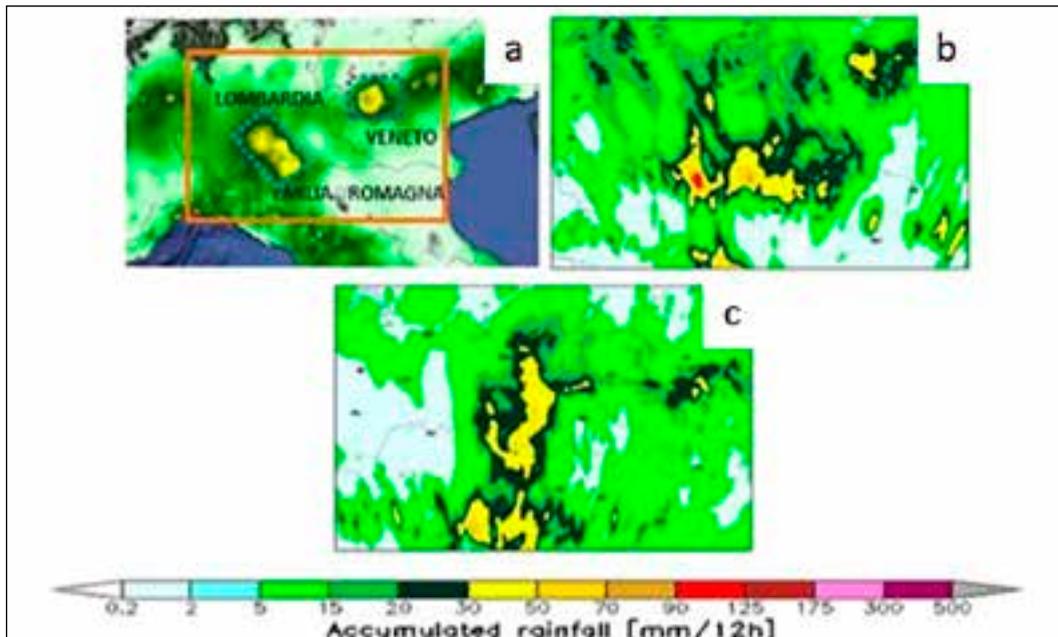


Figura 6 – Mappa delle precipitazioni accumulate per 12 ore fino alle 00:00 UTC del 28 aprile 2015 (a), previsione ottenuta senza assimilazione di dati ancillari (WRF\_CTRL) (b), previsione con assimilazione del dato SAR, WRF\_SAR (c).

precipitazioni accumulate derivate dalla rete di pluviometri della piattaforma DEWETRA. In particolare, per quanto riguarda quest'ultima, è stato scelto per il confronto le 12 ore di pioggia accumulate fino alle 00:00 UTC di martedì 28 aprile 2015 ed è stata focalizzata l'attenzione sull'area delimitata dal box arancione nella figura 6, dove sono chiaramente visibili due celle pluviometriche.

Come si può notare, in tutte le simulazioni del modello si trova una sovrastima in termini di estensione dell'area interessata dalla precipitazione. La previsione senza assimilazione WRF\_CTRL, mostra alcune celle convettive con precipitazioni accumulate tra 90 e 125 mm/12h che sono chiaramente sovrastimate rispetto alla situazione osservata attraverso la rete pluviometrica e produce diverse celle isolate di 30-50 mm/12h che non sono osservate. L'assimilazione dei dati SAR mostra un impatto positivo nella Pianura Padana, riproducendo correttamente le celle convettive e quindi riducendo la quantità di precipitazioni ed eliminando le celle isolate che non sono state osservate dai pluviometri. Inoltre, le simulazioni

WRF\_SAR riducono e spostano verso sud-est la cella sul Veneto.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti per il secondo evento, è stato scelto per il confronto le 12 ore di pioggia accumulate fino alle 00:00 UTC di sabato 12 novembre 2016 osservate dai pluviometri della rete DEWETRA. Secondo i pluviometri, le precipitazioni sono concentrate sul Veneto e nella parte orientale dell'Emilia-Romagna, mentre non si trovano celle in Lombardia e nella parte occidentale dell'Emilia-Romagna.

Anche se la concentrazione di celle convettive è meno significativa in questo caso, guardando le diverse configurazioni di simulazione, ci sono grandi differenze tra loro, il che significa che la procedura di assimilazione ha avuto un forte impatto sulle previsioni. In questo caso la simulazione senza assimilazione, ossia WRF\_CTRL, tende a sottostimare la situazione generale. Per quanto concerne la simulazione WRF\_SAR, si trova un buon accordo tra il modello e l'osservazione sia per la localizzazione del pattern di precipitazione sia per la valutazione della sua intensità. Si noti che in questo

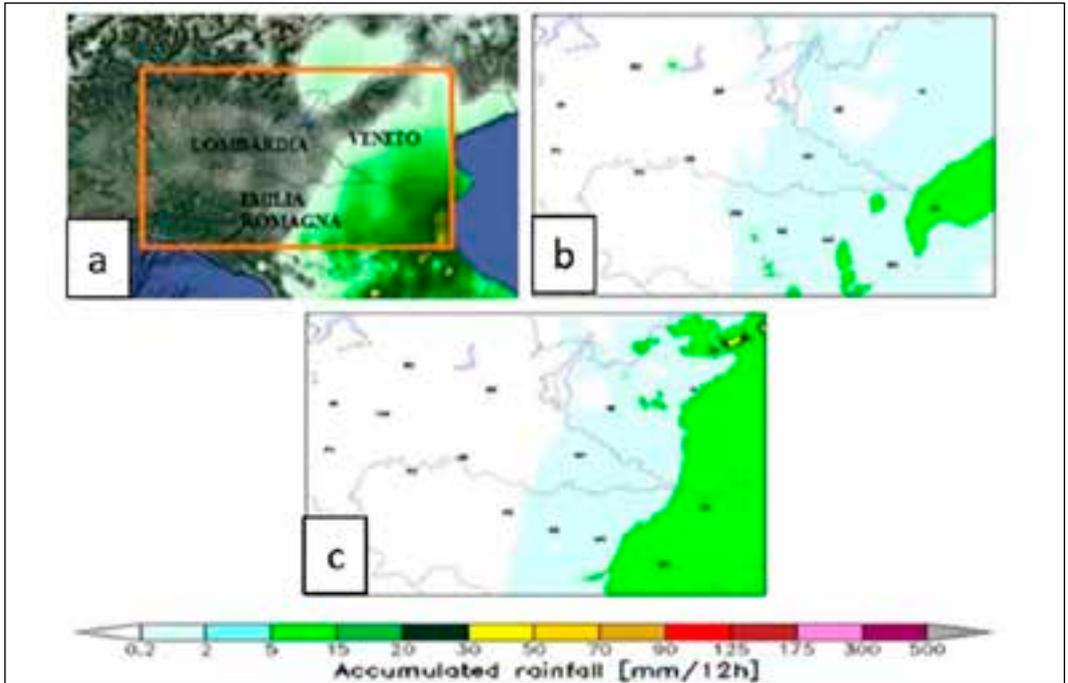


Figura 7 – Mappa delle precipitazioni accumulate per 12 ore fino alle 00:00 UTC del 12 novembre 2016 (a), previsione ottenuta senza assimilazione di dati ancillari (WRF\_CTRL) (b), previsione con assimilazione del dato SAR, WRF\_SAR (c).

caso la distribuzione delle precipitazioni è ben riprodotta anche in Veneto, ma una sovrastima si trova nel nord est del dominio (piccole celle gialle in alto a destra). Vale la pena notare che i diversi risultati ottenuti per i due eventi derivano dalla situazione sinottica abbastanza diversa dei due eventi: il primo può essere classificato come un “evento di precipitazione moderata/pesante”, il secondo come un “evento di precipitazione leggera” (PIERDICCA *et al.*, 2020). Nel complesso, questa valutazione qualitativa suggerisce un impatto positivo dell’assimilazione dei dati SAR.

#### 4. Conclusioni

È stato presentato un approccio globale per derivare l’APS dall’interferometria SAR multi-temporale, ed è stata discussa la capacità di questa tecnica di rilevare la distribuzione spaziale dell’atmosfera, in particolare della troposfera. La mappa ZTD derivata dall’interferome-

tria differenziale SAR è stata poi assimilata nel modello numerico di previsione meteorologica WRF ed i miglioramenti ottenibili in termini di capacità di previsione sono stati valutati per due casi di studio. Un confronto qualitativo e quantitativo delle previsioni con i dati di un pluviometro ha mostrato un impatto positivo moderato, ma comunque evidente del prodotto InSAR. La sua assimilazione ha mitigato la sovrastima delle celle del tasso di pioggia in un caso, e la sottostima del tasso di pioggia nell’altro caso.

In tutti i confronti le misure SAR si sono dimostrate affidabili in termini di copertura spaziale e risoluzione, anche se si sono rivelate necessarie delle procedure di pre-elaborazione, solo accennate in questo lavoro, al fine di assimilare il dato in maniera corretta. Il sensore SAR è in grado di misurare l’APS e le mappe risultanti ricalcano il suo andamento spaziale in maniera coerente rispetto a quello riprodotto dal modello WRF. A sua volta, il modello è in grado di prevedere le precipitazioni in modo migliore, poiché le sue condizioni iniziali sono arricchite

te da dati ancillari, il che significa che l'uso congiunto di più dati, in questo caso D-InSAR e risultati WRF, può migliorare i risultati nella direzione delle previsioni a breve termine.

## Ringraziamenti

Si ringrazia il prof. Nazzareno Pierdicca dell'Università di Roma "La Sapienza", per il supporto prestato alla realizzazione del presente lavoro.

## BIBLIOGRAFIA

- ALPERS, W., ROSS, D.B., RUFENACH, C.L., 1981 – *On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar*, Journal of Geophysical Research, vol 86, 6481–6498
- ALSHAWAF F., HINZ, S., MAYER, N., MEYER, J.F., 2015 – *Constructing accurate maps of atmospheric water vapor by combining interferometric synthetic aperture radar and GNSS observations*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120, doi: 10.1002/2014JD022419
- BAMLER, R., HARTL, P., 1998 – *Synthetic Aperture Radar interferometry, inverse problems*, Vol. 14, R1 – R54.
- BARINDELLI S., REALINI, E., VENUTI, G., FERMI, A. GATTI, A., 2018 – *Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers*, Earth, Planets and Space, 70, 10.1186/s40623-0180795-7
- BERARDINO P., FORNARO, G., LANARI, R., SANSOSTI, E., 2002 – *A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375-2383, doi: 10.1109/TCRS.2002.803792
- BOUMAN, B.A.M., VAN KASTEREN, H.W.J., 1990 – *Ground-based X-band (3-cm wave) Radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barley and oats; the impact of canopy structure*, Remote Sensing and Environment, 34, 107–118.
- CHANG, L., LIU, M., GUO, L., HE, X., GAO, G., 2016 – *Remote sensing of atmospheric water vapor from synthetic aperture radar interferometry: case studies in Shanghai, China*, Journal of Applied Remote Sensing, 10(4)
- DELL'ACQUA, F., GAMBA P., 2012 – *Remote sensing and earthquake damage assessment: experiences, limits, and perspectives*, Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 10, 2876-2890, doi: 10.1109/JPROC.2012.2196404
- FERRETTI, A., MONTI-GUARNIERI, A., PRATI, C., ROCCA, F., MASSONNET, D., 2007 – *InSAR principles: guidelines for SAR Interferometry processing and interpretation*, ESA Publications ESTEC, TM-19
- MASSONNET, D., FEIGL, K.L., 1998 – *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*, Reviews of Geophysics, 36, 441–500. Applied Sciences, 7, 1264, 33 of 39
- MATEUS P., NICO, G., TOMÉ, R., CATALÃO, J., P., MIRANDA, P.M.A., 2013 – *Experimental Study on the Atmospheric Delay Based on GPS, SAR Interferometry, and Numerical Weather Model Data*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51, 1, 6-11
- MATEUS P., TOMÉ, R., NICO, G., CATALÃO, J., 2016 – *Three-Dimensional Variational Assimilation of InSAR PWV Using the WRFDA Model*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 54, N. 12
- MATEUS P., CATALÃO, J., NICO, G., 2017 – *Sentinel-1 Interferometric SAR Mapping of Precipitable Water Vapor Over a Country-Spanning Area*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55 (5), 2993-2999
- MOREIRA, A. PRATS-IRAOLA, P., YOUNIS, M., KRIEGER, G., HAJNSEK, I., PAPANASSIOU, K.P., 2013 – *A tutorial on synthetic aperture radar*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 6-43
- MURALI, Y., SURENDRA PRASAD BABU, M., 2013 – *Effect of Speckle Filtering On SAR High Resolution Data for Image Fusion*, International Journal of Engineering and Innovative Technology, Volume 3, Issue 1
- PICHELLI E., FERRETTI, R., CIMINI, D., PERISSIN, D., MONTOPOLI, M., MARZANO, F.S., PIERDICCA, N., 2010 – *Water vapour distribution at urban scale using high-resolution numerical weather model and spaceborne SAR interferometric data*, Natural Hazards Earth System Sciences, 10, 121–132
- PICHELLI E., FERRETTI, R., CIMINI, PANEGROSSI, G., PERISSIN, D., PIERDICCA, N., ROCCA, F., ROMMEN, B., 2015 – *InSAR Water Vapor Data Assimilation into Mesoscale Model MM5: Technique and Pilot Study*, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8 (8), pp. 3859-3875, doi:10.1109/JSTARS.2014.2357685
- PIERDICCA, N., MAIELLO, I., SANSOSTI, E., VENUTI, G., BARINDELLI, S., FERRETTI, R., GATTI, A., MANZO, M., MONTI GUARNIERI, A., MURGIA, F., REALINI, E., VERDE, S., 2020 – *Excess path delays from Sentinel-1 interferometry to improve weather forecast*, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, doi 10.1109/jstars.2020.2988724
- ROSEN, P.A., HENSLEY, S., JOUGHIN, I.J., LJ, F.K., MADSEN, S.R., RODRIGUEZ, E., GOLDSTEIN, R.M., 2000 – *Synthetic aperture Radar interferometry*, Proceedings of the IEEE, 88, 333–382
- TANG, W., LIAO, M., ZHANG, L., LI, W., YU, W., 2016 – *High-spatial- resolution mapping of precipitable water vapor using SAR interferograms, GPS observations and ERA-Interim reanalysis*, Atmospheric Measurement Techniques, 9 (9)
- WRF Website: Weather Research and Forecasting Model | MMM: Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory (ucar.edu)

**Federica Murgia**

E-mail: federica.murgia@crea.gov.it,

Tel. +39 0461 381 144

Centro di ricerca per le Foreste e il Legno  
Consiglio per la ricerca in agricoltura  
e l'analisi dell'economia agraria (CREA) – Trento

**PAROLE CHIAVE:** *Synthetic Aperture Radar (SAR), interferometria, modelli previsionali, telerilevamento, meteorologia*

**RIASSUNTO**

Il radar ad apertura sintetica (dall'inglese Synthetic Aperture Radar, da cui deriva l'acronimo SAR) è un sistema di telerilevamento a microonde attivo e coerente che consente di generare immagini ad alta risoluzione da grandi distanze, generalmente dallo spazio. Il SAR permette non solo di effettuare un monitoraggio accurato delle deformazioni della superficie terrestre, ma anche di acquisire informazioni sull'atmosfera. Tutto ciò è possibile grazie all'interferometria SAR, una tecnica che permette di misurare uno spostamento attraverso la determinazione della differenza di fase del segnale elettromagnetico tra due o più immagini SAR acquisite sulla stessa area in momenti diversi o nello stesso istante, ma da posizioni leggermente differenti. Lo studio dell'atmosfera ed una migliore comprensione dei meccanismi che la regolano è di fondamentale importanza in ambito meteorologico. In questo lavoro verranno riassunte le elaborazioni necessarie per ottenere informazioni sul ritardo di fase atmosferico da una serie di immagini SAR. Le immagini ottenute saranno poi confrontate con dati relativi al ritardo di fase provenienti da mo-

delli numerici. Infine, verrà valutato l'effetto dell'assimilazione di tali immagini all'interno di modelli previsionali a media scala.

**KEYWORDS:** *Synthetic Aperture Radar (SAR), interferometry, numerical weather prediction models, remote sensing, meteorology*.  
*Introduzione*

**ABSTRACT**

The Synthetic Aperture Radar (SAR) sensor is an active and coherent microwave system widely used in the remote sensing framework, able to generate high-resolution images of the Earth surface at a great distance, generally from the space. It not only allows to accurately control and monitor surface deformations, but it is able to retrieve useful information on the atmosphere. This is possible thanks to SAR Interferometry, an advanced processing technique that measures a displacement by means of the measure of the phase difference in the electromagnetic signal among two or more SAR images acquired over the same area at different times, or at the same time but from slightly different observation positions. In the framework of meteorology studies, it is fundamental to get a better knowledge of the atmosphere and the mechanisms regulating it. In this work, all the processing procedures required to gather this information from SAR interferometric data will be described, as well as the comparison and validation analyses done with ancillary data as numerical weather prediction models output ones. Thus, the effect of assimilating such data into numerical weather prediction models will be briefly described and assessed.