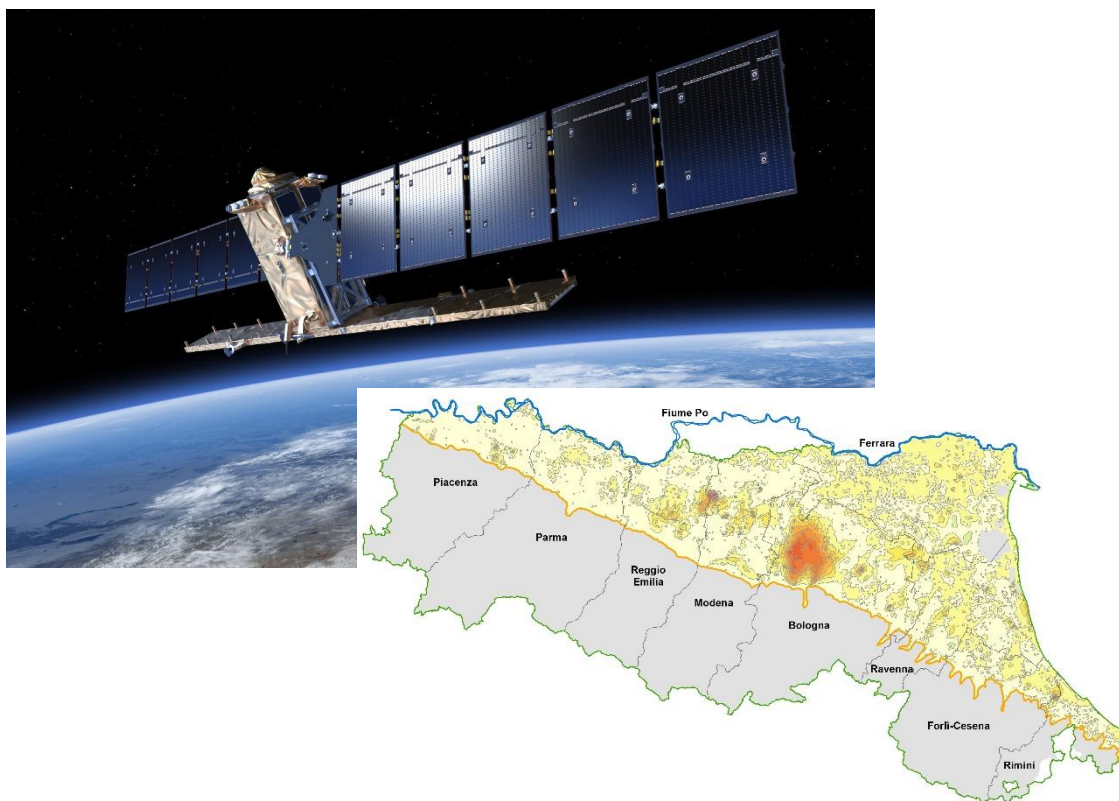


MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO E AGGIORNAMENTO DELLA CARTOGRAFIA DI SUBSIDENZA NELLA PIANURA DELL'EMILIA-ROMAGNA

Periodo 2016-2021



Bologna, Luglio 2023

Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

Patrizia Ercoli, Responsabile dell'Area Tutela e Gestione dell'Acqua - Settore Tutela dell'Ambiente ed Economia circolare

Immacolata Pellegrino, Area Tutela e Gestione dell'Acqua - Settore Tutela dell'Ambiente ed Economia circolare

Addolorata Palumbo, Area Tutela e Gestione dell'Acqua - Settore Tutela dell'Ambiente ed Economia circolare - Pianificazione in materia di tutela e gestione risorse idriche

Referenti per Arpae Emilia-Romagna:

Daniela Lucchini, Responsabile del Centro Tematico Regionale Sistemi idrici - Direzione Tecnica

Marco Marcaccio, Monitoraggio stato ambientale Acque sotterranee - Centro Tematico Regionale Sistemi idrici - Direzione Tecnica

Documento a cura di:

Marco Marcaccio e Marianna Mazzei

Monitoraggio stato ambientale Acque sotterranee - Centro Tematico Regionale Sistemi idrici - Direzione Tecnica Arpae

Hanno collaborato alle diverse attività:

Gabriele Bitelli, Luca Vittuari, Eugenia Giorgini, Alessandro Lambertini (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - Università di Bologna) – Collaborazione scientifica a supporto delle attività ed elaborazione dati stazioni GNSS, verifica della calibrazione dati interferometrici, supporto nell'individuazione di outlier e spazializzazione dei dati di subsidenza.
TRE Altamira - Telerilevamento Europa S.r.l. - Analisi interferometrica e calibrazione dei dati radar satellitari.

Monica Carati (Arpae, Direzione Tecnica) – Cartografia ed elaborazioni GIS.

Andrea Chahoud, Paolo Spezzani (Centro Tematico Regionale Sistemi idrici - Direzione Tecnica Arpae) – Dati e valutazioni sui prelievi idrici da acque sotterranee.

Luisa Perini, Paolo Severi (Area Geologia, Suoli e Sismica - Settore Difesa del territorio - Regione Emilia-Romagna) e **Giacomo Zaccanti** (Servizio Osservatorio Energia Rifiuti e Siti contaminati - Direzione Tecnica Arpae) – per la condivisione di dati di monitoraggio e per il continuo confronto metodologico.

Si ringraziano INGV, GEOTOP-TOPCON, FoGER, HEXAGON, ENI e STOGIT per la disponibilità dei dati grezzi delle stazioni permanenti GNSS.

INDICE

Premessa	5
1. Monitoraggio dei movimenti verticali del suolo e la cartografia di subsidenza in Emilia-Romagna	6
1.1 Elaborazione dati interferometrici a singola e doppia geometria	6
1.2 Criteri e aspetti migliorativi nel monitoraggio dei movimenti verticali del suolo in Emilia-Romagna nel periodo 2016-2021	10
1.2.1 Costellazione satelliti Sentinel (Agenzia Spaziale Europea)	10
1.2.2 Dati interferometrici Sentinel-1 e Radarsat-2	11
2. Analisi interferometrica nel periodo 2016-2021	14
2.1 Dati satellitari acquisiti e preparazione dei siti di elaborazione.....	15
2.2 Risultati dell'analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione	16
2.2.1 Sito di elaborazione OVEST	18
2.2.2 Sito di elaborazione EST.....	19
2.3 Dati disponibili per territorio provinciale	19
2.3.1 Dati interferometrici in provincia di Piacenza	20
2.3.2 Dati interferometrici in provincia di Parma.....	21
2.3.3 Dati interferometrici in provincia di Reggio Emilia.....	22
2.3.4 Dati interferometrici in provincia di Modena.....	23
2.3.5 Dati interferometrici in provincia di Bologna	24
2.3.6 Dati interferometrici in provincia di Ferrara.....	25
2.3.7 Dati interferometrici in provincia di Ravenna.....	26
2.3.8 Dati interferometrici in provincia di Forlì-Cesena	27
2.3.9 Dati interferometrici in provincia di Rimini	28
2.4 Verifica dei risultati, allineamento a scala regionale e calcolo delle velocità medie di spostamento (pre-calibrazione)	28
3. Analisi delle stazioni permanenti GNSS	31
3.1 Definizione della rete di inquadramento	31
3.2 Stazioni permanenti analizzate nel territorio dell'Emilia-Romagna.....	32
3.3 Elaborazione delle osservazioni giornaliere	34
3.4 Stima delle velocità relative	35
4. Calibrazione dell'analisi interferometrica, validazione dei dati e cartografia dei movimenti verticali del suolo.....	37
4.1 Calibrazione dell'analisi interferometrica SqueeSAR™	37
4.2 Verifiche dei risultati della calibrazione	46
4.3 Restituzione finale del dataset interferometrico calibrato 2016-2021	48
4.4 Verifica e validazione delle velocità verticali del suolo	49

4.5 Realizzazione della cartografia dei movimenti verticali del suolo nella zona di pianura.....	51
5. Analisi dei movimenti verticali del suolo 2016-2021	54
5.1 Analisi delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo	57
5.2 Provincia di Piacenza.....	62
5.3 Provincia di Parma.....	63
5.4 Provincia di Reggio Emilia.....	64
5.5 Provincia di Modena.....	66
5.6 Provincia di Bologna.....	67
5.7 Provincia di Ferrara.....	68
5.8 Provincia di Ravenna.....	69
5.9 Provincia di Forlì-Cesena.....	70
5.10 Provincia di Rimini	71
5.11 Il litorale.....	72
5.12 Evoluzione dei movimenti verticali del suolo nei Comuni della pianura emiliano-romagnola dal 2006 al 2021.....	74
5.13 La zona collinare e montana	78
6. Livelli delle falde, prelievi da acque sotterranee e precipitazioni nel periodo 2016-2021	81
6.1 Variazione dei livelli di falda in Emilia-Romagna nel periodo 2016-2021	81
6.2 Prelievi idrici da acque sotterranee e ricarica degli acquiferi	85
6.3 Monitoraggio automatico della subsidenza tramite assestimetri	89
Conclusioni	91
Documenti di riferimento	95
Allegati	97
Allegato 1: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Scala 1:250.000.....	97
Allegato 2: Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2011-2016 al periodo 2016-2021. Scala 1:250.000	97
Allegato 3: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000.....	97
Allegato 4: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Zona costiera. Scala 1:100.000	97

Premessa

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo viene svolto in Emilia-Romagna da oltre 20 anni con frequenza quinquennale nella sola porzione di territorio di pianura. La subsidenza è quel fenomeno che porta ad un abbassamento nel tempo della superficie topografica, dovuta ad esempio al normale costipamento nel tempo dei sedimenti delle pianure alluvionali o delle zone costiere, causato da fattori sia naturali (compattazione dei sedimenti, tettonica, isostasia), sia di origine antropica per effetto dell'urbanizzazione, delle bonifiche o dell'estrazione di fluidi dal sottosuolo.

Le modalità di monitoraggio si sono evolute nel tempo e in Emilia-Romagna si è passati da rilievi topografici effettuati fino all'anno 2005 tramite livellazione geometrica di alta e altissima precisione, utilizzando una rete di capisaldi nella zona di pianura del territorio regionale, a elaborazione di dati interferometrici satellitari, a partire dall'anno 2005, che restituiscono, con opportune tecniche di elaborazione e calibrazione dei dati, una velocità media di movimento verticale del suolo con un dettaglio temporale e spaziale molto maggiore rispetto le tecniche tradizionali di monitoraggio.

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo viene svolto anche in automatico, ad alta frequenza, in alcuni punti rappresentativi del territorio regionale, attraverso assestimetri che restituiscono 2 misure al giorno di abbassamento del suolo rispetto le profondità a cui l'assestmetro è ancorato nel sottosuolo. Nel 2005 sono stati infatti posizionati a Castel Maggiore (BO) due assestimetri alle profondità rispettivamente di 100 m e 200 m per studiare come varia il fenomeno della subsidenza alle diverse profondità e nel tempo (Arpa Emilia-Romagna, 2005) e confrontare il risultato rispetto la subsidenza totale misurata.

Nel presente documento vengono riassunte le principali attività svolte con l'obiettivo di aggiornare i dati di monitoraggio dei movimenti verticali del suolo e della cartografia di subsidenza del periodo 2016-2021 al fine di confrontare i risultati con i precedenti periodi di monitoraggio, ed evidenziare in questo modo l'evoluzione del fenomeno della subsidenza nella zona di pianura.

Considerando le attività svolte su questo tema in Emilia-Romagna dal 2005, l'aggiornamento dei movimenti verticali del suolo e il confronto dei risultati con le elaborazioni pregresse deve contare su una minimizzazione delle differenze nella modalità di elaborazione dei dati rispetto le precedenti elaborazioni, mantenendo pertanto la tecnica SqueeSARTM con successiva calibrazione dell'analisi interferometrica con i dati derivanti dalle stazioni permanenti GNSS. La tecnica brevettata SqueeSARTM è una tecnica di analisi interferometrica multi-immagine che permette di ricostruire gli spostamenti differenziali della superficie terrestre attraverso i dati SAR (*Synthetic Aperture Radar*) trasmessi dai satelliti, raggiungendo precisioni del millimetro.

Per ridurre inoltre le possibili differenze derivanti dall'uso di dati di diversi satelliti per coprire l'intero territorio di pianura dell'Emilia-Romagna, occorre disporre di dati interferometrici satellitari per il periodo 2016-2021 dell'intero territorio della Regione Emilia-Romagna, in particolare della zona di pianura, e contestualmente disporre di dati a doppia geometria (movimento dei satelliti nelle orbite ascendente e discendente rispetto all'equatore e polo nord), che permettono di valutare anche gli spostamenti est-ovest oltre quelli verticali, come auspicato durante la redazione dell'ultimo aggiornamento della cartografia 2011-2016, che è stata realizzata a singola geometria (ascendente).

1. Monitoraggio dei movimenti verticali del suolo e la cartografia di subsidenza in Emilia-Romagna

Nel 2011-12 Arpa Emilia-Romagna, su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il DICAM dell'Università di Bologna, realizzò il rilievo dei movimenti verticali del suolo nell'area di pianura della regione Emilia-Romagna, utilizzando il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari con tecnica SqueeSAR™ (algoritmo PSInSAR™ di seconda generazione). Tramite tale rilievo fu realizzata la carta delle velocità di movimento verticale del suolo del periodo 2006-2011, elaborando dati radar acquisiti in tale periodo dal satellite RADARSAT-1.

Nel 2016-2017, sono state aggiornate le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola per il periodo 2011-2016, utilizzando sempre la tecnica SqueeSAR™, ulteriormente affinata, per analizzare dati radar, acquisiti dai satelliti RADARSAT-1 e RADARSAT-2 mentre, per un'area limitata del territorio parmense, non adeguatamente coperta da dati RADARSAT, è stato necessario acquisire immagini derivanti dalla costellazione COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana.

In particolare quest'ultimo rilievo è stato effettuato in due fasi successive: in una prima fase (2016-17) è stata effettuata l'analisi interferometrica, tramite la tecnica SqueeSAR™, dei dati radar satellitari Radarsat-2 e Cosmo SkyMed per alcuni areali specifici, acquisiti con una sola geometria sull'intera area di pianura dell'Emilia-Romagna, individuando i punti di misura presenti, le loro velocità medie annue e le relative serie storiche di spostamento nel periodo 2011-2016.

Nella seconda fase del lavoro (2017-18) si è proceduto all'allineamento a scala regionale e alla calibrazione dei risultati dell'analisi SqueeSAR™, tramite i dati di movimento verticale, ottenuti dall'elaborazione di 16 stazioni permanenti GPS. Ulteriori 6 stazioni GPS permanenti sono state utilizzate per un controllo dei risultati a posteriori (validazione).

Successivamente è stata effettuata un'analisi particolarmente accurata sul totale di 1.974.150 punti di misura individuati, di cui 1.285.490 nell'areale parmense (Cosmo SkyMed) e 688.660 nel resto del territorio di pianura (Radarsat), al fine di selezionare i punti considerati non significativi rispetto le finalità del lavoro: sono state pertanto implementate, in accordo con la Regione, procedure volte alla ricerca di punti, caratterizzati da velocità "anomale" rispetto al loro intorno, indicativi di fenomeni diversi e non attinenti al fenomeno della subsidenza. Si tratta, in sostanza, di fenomeni estremamente localizzati legati a cedimenti di singole strutture, lavori e attività svolte sul territorio, o all'assestamento di opere di recente costruzione. Le procedure di selezione implementate hanno portato ad un dataset finale pari a 1.912.781 punti, essendo stati scartati 61.369 punti.

Il dataset definitivo così ottenuto è stato usato per un'interpolazione che ha generato un grigliato regolare (100x100 m) delle velocità di movimento verticale sull'intero territorio di pianura della regione. Da esso è stata generata la carta dei movimenti verticali del suolo a scala regionale relativa al periodo 2011-2016, tramite una rappresentazione a curve isocinetiche con un passo di 2.5 mm/anno e una precisione stimata in ± 2 mm/anno, che risulta confrontabile con la cartografia realizzata nel periodo precedente (2006-2011), permettendo di confrontare le differenze dei movimenti verticali del suolo nei due periodi.

1.1 Elaborazione dati interferometrici a singola e doppia geometria

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche della superficie terrestre a frequenze comprese tra 500 MHz e 10 GHz, con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa, sia di giorno che di notte. Il sensore RADAR (acronimo di *RAdio Detecting And Ranging*) montato sul satellite invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre; gli elementi presenti sulla superficie terrestre riflettono il segnale, rinviandone verso il satellite una porzione (retrodiffusione). In generale, misurando il tempo trascorso tra l'invio del segnale e la ricezione del segnale retrodiffuso,

il sistema radar è in grado di determinare la distanza tra il sensore ed il bersaglio. Dunque, se l'oggetto si trova in un'area affetta da movimenti del suolo, il sensore rileva tra un'immagine e la successiva una variazione di distanza e quindi il movimento del bersaglio in avvicinamento o allontanamento rispetto al satellite stesso. Utilizzando più acquisizioni sulla stessa area è possibile ricostruire l'andamento dello spostamento del bersaglio a terra nel tempo (Figura 1.1).

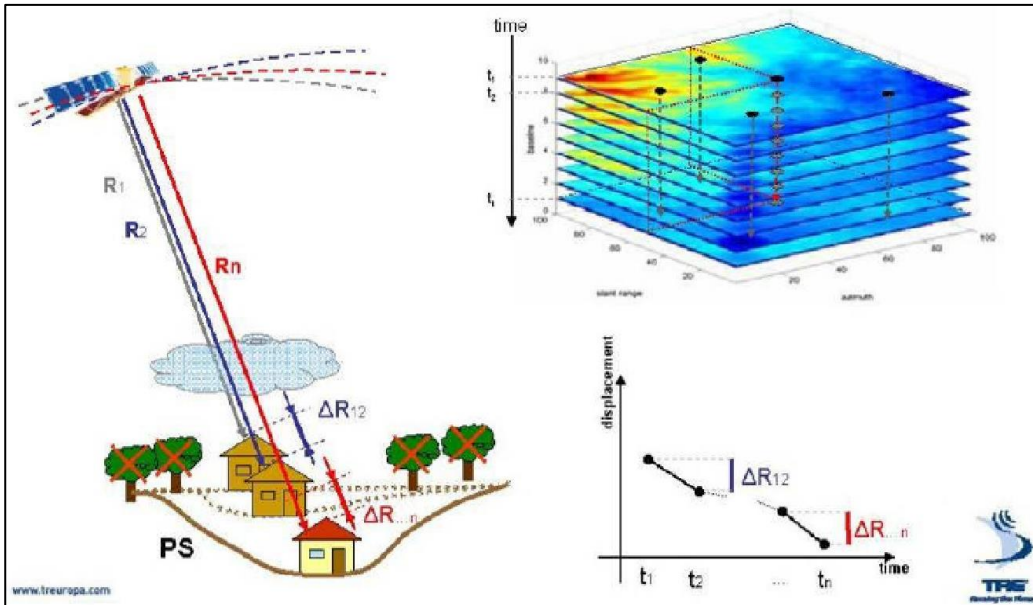


Figura 1.1: Rappresentazione della tecnica PSInSARTM basato sulla misura di variazione di distanze.

Le immagini acquisite dai satelliti restituiscono la posizione e la distanza lungo la linea di osservazione (LOS; *Line Of Sight*, oppure detta *Range*, *R*) dei punti riflettenti a terra opportunamente individuati, che possono essere caratteristici di elementi puntuali o distribuiti:

- *Permanent Scatterers* (PS): bersagli radar puntuali presenti normalmente a terra, come ad esempio manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito);
- *Distributed Scatterers* (DS): bersagli radar distribuiti, ovvero aree irregolari come campi non coltivati, aree detritiche o desertiche non sabbiose rilevate tramite la tecnica SqueeSARTM; in questo caso la posizione del bersaglio è associata al baricentro elettromagnetico dell'area stessa. Il dato è dunque in apparenza puntuale ma la sua natura è areale, differendo così dai dati finora comunemente usati nel monitoraggio della subsidenza (capisaldi di livellazione o vertici GPS). Si tratta però di un dato importante e prezioso in quanto fornisce indicazioni in aree dove non sono presenti PS che sarebbero rimaste prive di informazione.

Per ricostruire il movimento di ciascun PS o DS è necessario analizzare la differenza degli spostamenti, considerando un'immagine e la successiva, nell'intervallo di tempo considerato. Opportune correzioni e calibrazioni permettono quindi di ottenere per ciascun punto la velocità media di movimento verticale in mm/anno.

Considerando che i satelliti acquisiscono lungo una direzione inclinata di un angolo θ , *off-nadir*, rispetto alla verticale (da circa 20° a 45°), i movimenti misurati dal satellite sul singolo PS risultano essere la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio (Figura 1.2).

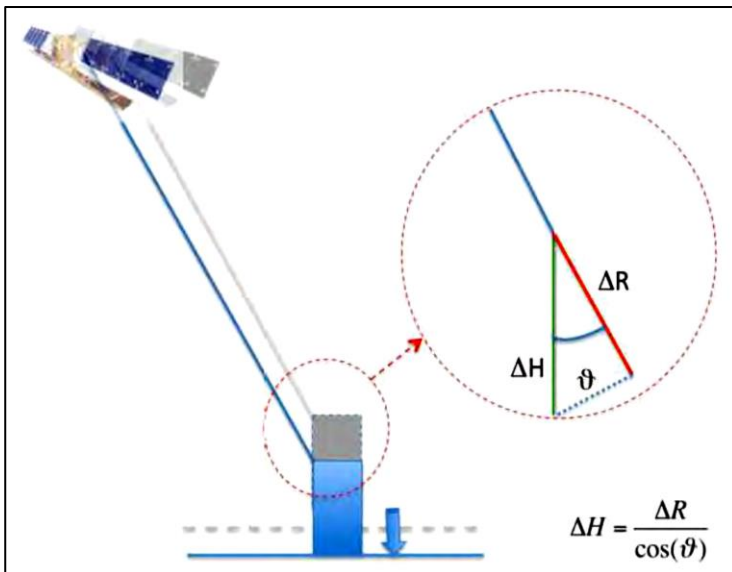


Figura 1.2: Velocità di movimento riportata dalla LOS(ΔR) alla verticale (ΔH).

I diversi satelliti si muovono intorno alla terra secondo orbite stabilite, al fine di ottenere una copertura omogenea delle aree del pianeta di interesse, e con un tempo di rivisitazione delle stesse aree che in genere è dell'ordine di alcuni giorni. I satelliti si possono muovere nelle diverse orbite procedendo da sud verso nord, oppure al contrario da nord verso sud: considerando anche il moto di rotazione terrestre, una stessa area sulla superficie della terra risulta visibile dal sensore del satellite in due diverse geometrie di acquisizione, rispettivamente ascendente (ASC), quando il satellite si muove verso nord e discendente (DESC), quando il satellite si muove verso sud, come schematizzato in Figura 1.3. Nella geometria ascendente la parte di struttura meglio visibile è quella esposta verso ovest mentre per il dato discendente quella verso est.

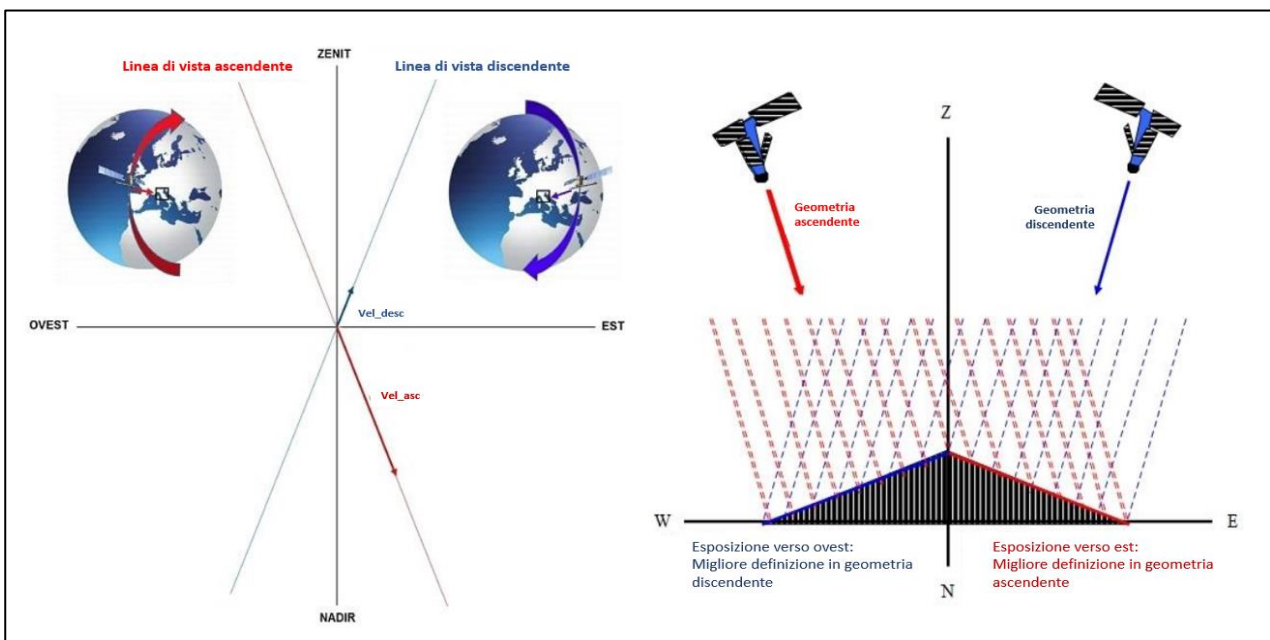


Figura 1.3: Schematizzazione delle due geometrie di acquisizione dei satelliti in base alle orbite intorno alla terra (a sinistra) e diversa ricezione da parte dei satelliti del dato interferometrico riflesso in base all'esposizione della superficie (a destra).

I sistemi SAR (*Synthetic Aperture Radar* - Radar ad Apertura Sintetica) consentono di ottenere immagini del territorio ad alta risoluzione, attraverso l'acquisizione di dati lungo la propria orbita, combinando tra loro i dati derivanti da viste differenti della stessa porzione di territorio osservata. In particolare, l'analisi interferometrica SqueeSARTM individua i bersagli radar presenti a terra e per ognuno di questi fornisce la localizzazione (coordinate e quota rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84), la velocità media misurata lungo la linea di vista del satellite (LOS) e la serie storica degli spostamenti misurati lungo LOS nel periodo monitorato.

Rispetto la singola geometria, le elaborazioni dei dati acquisiti dai satelliti in doppia geometria, ascendente e discendente, considerando trascurabile la componente di moto in direzione N-S, permettono di ottenere le componenti verticale e orizzontale (est-ovest) dello spostamento di un punto sulla superficie terrestre, attraverso la composizione trigonometrica delle grandezze osservate secondo le due geometrie (Figure 1.4 e 1.5).

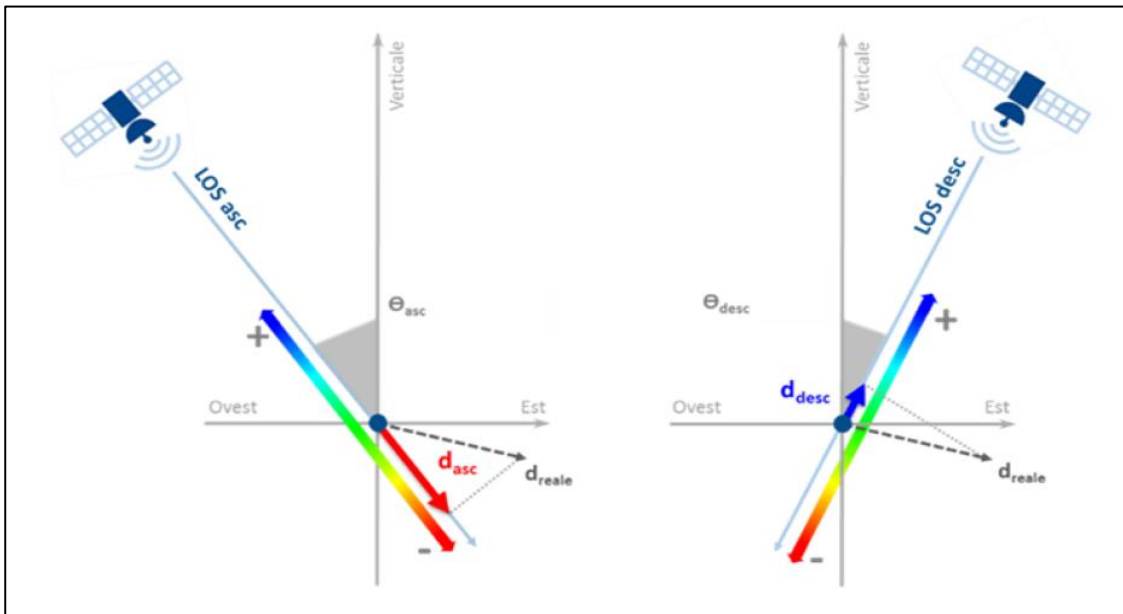


Figura 1.4: Geometrie di acquisizione del satellite ascendente e discendente. Di ogni movimento reale (d_{reale}) è misurata la sola componente lungo la linea di vista (LOS) del satellite. Le due componenti lungo LOS risultano avere modulo e segno diverso (nell'esempio, la componente d_{asc} è negativa, mentre la componente d_{desc} è positiva lungo LOS).

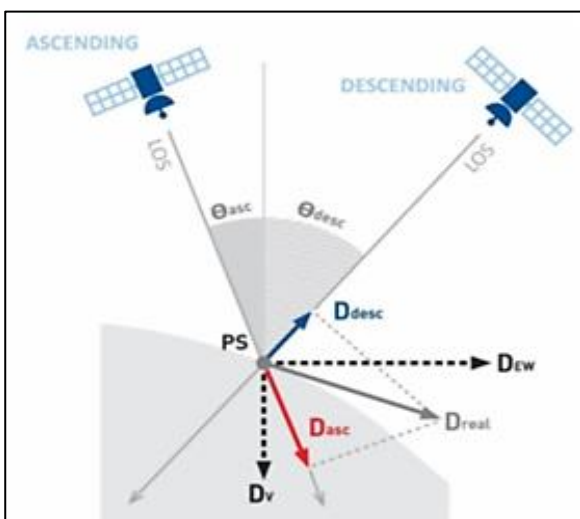


Figura 1.5: Combinazione trigonometrica dei dati derivanti dalla geometria di acquisizione ascendente e discendente per il calcolo delle componenti verticale ed orizzontale dei movimenti.

1.2 Criteri e aspetti migliorativi nel monitoraggio dei movimenti verticali del suolo in Emilia-Romagna nel periodo 2016-2021

L'aggiornamento della cartografia di subsidenza al periodo più recente (2016-2021) ha mantenuto nel suo complesso la stessa metodologia già utilizzata nel periodo precedente 2011-2016 al fine di confrontare le differenze dei risultati tra gli ultimi 2 periodi di monitoraggio e anche il periodo precedente (2006-2011). Per rispondere anche agli ulteriori obiettivi di miglioramento richiamati in premessa, l'avvio delle attività è stato preceduto da una verifica delle evoluzioni tecnologiche intervenute negli ultimi anni nell'ambito del rilievo interferometrico e nella tipologia di dati radar satellitari disponibili, come ad esempio i nuovi dati satellitari Sentinel. Le principali attività preliminari svolte per l'aggiornamento della cartografia dei movimenti verticali del suolo per il periodo 2016-2021 sono state finalizzate a verificare quanto segue:

- disponibilità di dati satellitari interferometrici per il periodo 2016-2021 dell'intero territorio dell'Emilia-Romagna, in particolare della zona di pianura. A tal fine è stata verificata la possibilità di utilizzare i nuovi dati acquisiti dall'Agenzia Spaziale Europea nell'ambito del Programma Copernicus (Satelliti Sentinel) e le differenze di questi ultimi rispetto i dati Radarsat utilizzati nelle precedenti elaborazioni cartografiche;
- modalità di elaborazione dei dati interferometrici per la realizzazione della nuova cartografia che permettano di valutare le differenze di velocità di movimento del suolo rispetto ai dati e alle cartografie disponibili per i precedenti periodi di monitoraggio;
- fattibilità tecnico-economica di effettuare elaborazioni interferometriche a doppia geometria (ascendente e discendente), come auspicato durante la redazione dell'ultimo aggiornamento della cartografia che era stata realizzata a singola geometria (ascendente);
- disponibilità e significatività di dati satellitari più di dettaglio, per approfondimenti specifici su aree particolarmente critiche per la velocità verticale del suolo, ad esempio Bologna, Ravenna e sul litorale.

1.2.1 Costellazione satelliti Sentinel (Agenzia Spaziale Europea)

Copernicus (www.copernicus.eu) è il programma di osservazione della Terra dell'Unione europea, dedicato a monitorare il nostro pianeta e il suo ambiente a beneficio di tutti i cittadini europei. Offre servizi di informazione basati sull'osservazione satellitare della Terra.

Il programma è coordinato e gestito dalla Commissione europea ed è attuato in collaborazione con gli Stati membri, l'Agenzia spaziale europea (ESA), l'Organizzazione europea per l'esercizio dei satelliti meteorologici (EUMETSAT), il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (CEPMET), le agenzie dell'UE e Mercator Océan. Il programma utilizza enormi quantità di dati globali provenienti da satelliti e da sistemi di misurazione terrestri, aerei e marittimi per fornire informazioni che aiutino i prestatori di servizi, le autorità pubbliche e altre organizzazioni internazionali a migliorare la qualità della vita dei cittadini europei. I servizi di informazione forniti sono accessibili agli utenti in modo libero e gratuito.

Il lancio in orbita del primo satellite del programma è avvenuto il 3 aprile 2014 nell'ambito della missione spaziale Sentinel-1, primo dei 2 satelliti della costellazione Sentinel-1. Diverse altre missioni si sono susseguite con lancio di altri satelliti o equipaggiamento di ulteriori sensori nei satelliti già in orbita (Sentinel-2, Sentinel-3, ecc.), con il fine di fornire dati e informazioni per garantire diversi Servizi Copernicus, al momento organizzati come segue:

- Monitoraggio atmosferico
- Monitoraggio dell'ambiente marino
- Monitoraggio del territorio
- Cambiamento climatico

- Gestione delle emergenze
- Sicurezza

1.2.2 Dati interferometrici Sentinel-1 e Radarsat-2

Nell'ambito dei servizi Copernicus di "Monitoraggio del territorio" sono contemplate anche le informazioni e i dati per valutare i movimenti del suolo, di cui la subsidenza (movimenti di abbassamento del suolo) ne rappresenta una elaborazione specifica. A questo fine, i satelliti utili al monitoraggio dei movimenti del suolo sono i due *Sentinel-1* (1A lanciato in orbita il 3 aprile 2014 e 1B lanciato in orbita il 26 aprile 2016) operanti con la medesima banda di frequenza (C-band frequency 5.405 GHz) dei satelliti dell'Agenzia Spaziale Canadese - *Radarsat-2* - i cui dati sono stati utilizzati, come già detto, anche nell'aggiornamento 2011-2016 della cartografia regionale di subsidenza. Anche la risoluzione media dei dati interferometrici Sentinel-1 è di 20x5 metri, come quella dei dati Radarsat-2 del monitoraggio 2011-2016. Nella Tabella 1.1 sono riportate le principali caratteristiche del modulo Sentinel-1 - C-SAR.

Nel precedente rilievo 2011-2016, che ha riguardato la sola porzione del territorio di pianura delimitato a monte dall'isolinea di quota 100 metri, non risultava adeguatamente coperta da dati Radarsat-2 una porzione del territorio parmense che ha costretto ad acquisire ed elaborare dati derivanti dalla costellazione Cosmo-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana, che offre una risoluzione molto maggiore, pari a 3x3 metri (Figura 1.6). L'utilizzo invece della costellazione Sentinel-1 permette di avere con la medesima definizione, la totale copertura dell'intero territorio regionale, quindi non solo la zona di pianura, ma anche la porzione montana, come evidente nella Figura 1.7, dove sono riportate anche le diverse modalità di acquisizione di Sentinel-1.

Tabella 1.1: Caratteristiche del modulo Sentinel-1

Centre frequency	5.405 GHz (corresponding to a wavelength of ~5.5465763cm cm)
Bandwidth	0-100 MHz (programmable)
Polarisation	HH+HV, VV+VH, VV, HH
Incidence angle range	20°- 46°
Look direction	right
Antenna type	Slotted waveguide radiators
Antenna size	12.3 m x 0.821 m
Antenna mass	880 kg (representing 40% of the total launch mass)
Azimuth beam width	0.23°
Azimuth beam steering range	-0.9° to +0.9°
Elevation beam width	3.43°
Elevation beam steering range	-13.0° to +12.3°
RF Peak power	- 4.368 kW, - 4.075 kW (IW, dual polarisations)
Pulse width	5-100 µs (programmable)
Transmit duty cycle	Max 12%, SM 8.5%, IW 9%, EW 5%, WV 0.8%
Receiver noise figure at module input	3 dB
Maximum range bandwidth	100 MHz
PRF (Pulse Repetition Frequency)	1 000 - 3 000 Hz (programmable)
Data compression	FDBAQ (Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization)
ADC sampling frequency	300 MHz (real sampling)
Data quantisation	10 bit
Total instrument mass (including antenna)	945 kg
Attitude steering	Zero-Doppler steering and roll steering

Fonte: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument>

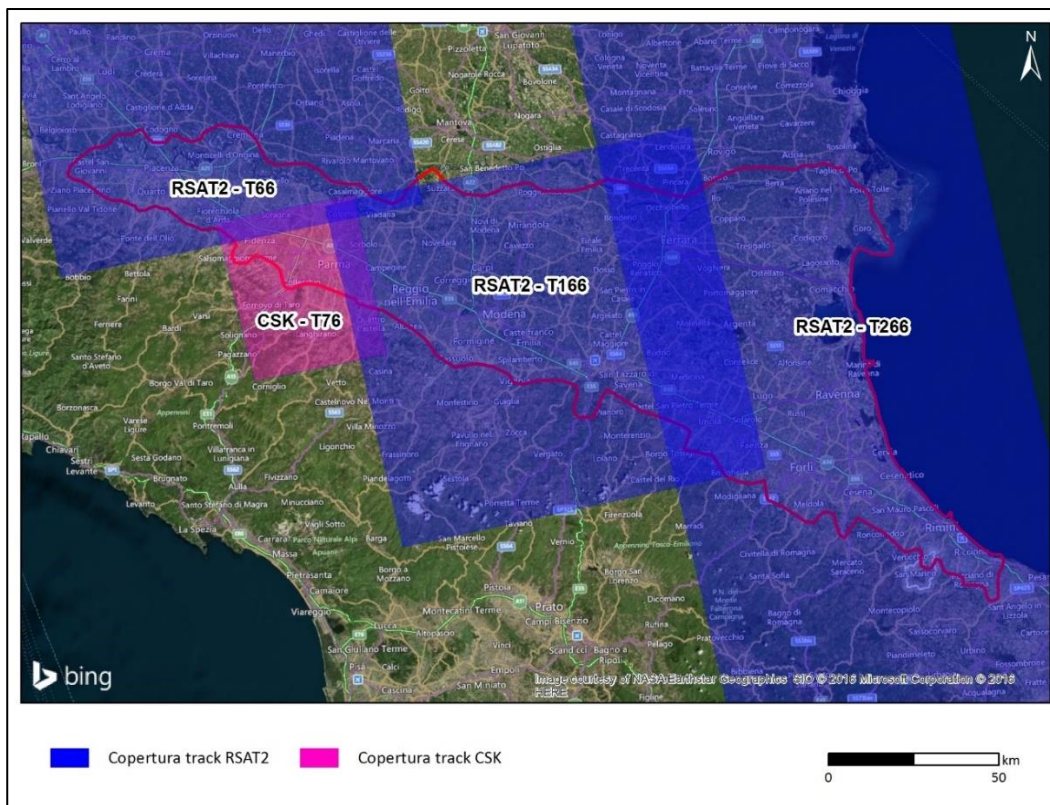


Figura 1.6: Copertura dati utilizzati per la cartografia 2011-2016 (Arpa e Regione Emilia-Romagna, 2018)

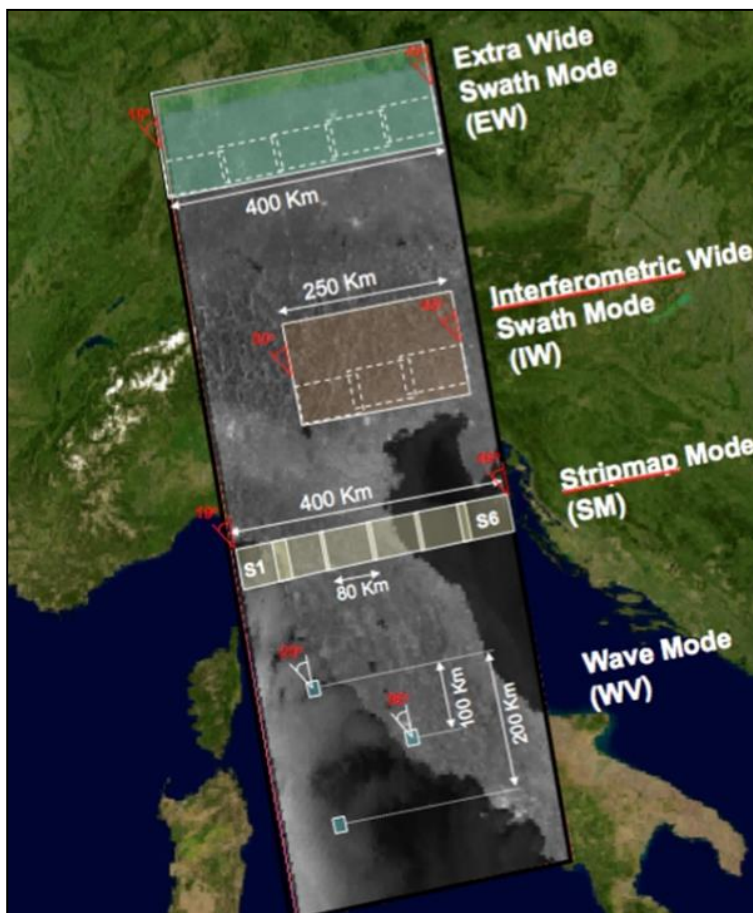


Figura 1.7: modalità di acquisizione sentinel-1 (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/revisit-and-coverage>)

Le elaborazioni svolte nel precedente monitoraggio inoltre, utilizzavano la sola geometria ascendente, mentre i dati Sentinel-1, per l'intero territorio regionale, sono disponibili sia in geometria ascendente sia discendente, permettendo in questo modo di analizzare nel dettaglio anche i movimenti orizzontali che nel precedente rilievo non era stato possibile effettuare.

Un singolo satellite Sentinel-1 è in grado potenzialmente di fare in 12 giorni il rilievo globale delle terre emerse del pianeta in modalità “*Interferometric Wide swath mode*”, mentre l'insieme dei due satelliti Sentinel-1 (1A e 1B) alle alte latitudini, come quelle europee, possono ridurre questo tempo fino a 2 giorni. Il tempo di rivisitazione di Radarsat-2 è invece di 24 giorni, pertanto con la costellazione Sentinel-1 si possono ottenere nello stesso arco temporale almeno il doppio delle misure rispetto a Radarsat-2.

In sintesi, l'utilizzo dei dati interferometrici Sentinel-1 ha permesso di ottenere l'aggiornamento del monitoraggio dei movimenti verticali del suolo – cartografia di subsidenza – in Emilia-Romagna per il periodo 2016-2021 con i seguenti aspetti migliorativi rispetto al precedente monitoraggio effettuato nel 2011-2016:

- medesima banda di frequenza (C-band frequency 5.405 GHz) dei due satelliti Sentinel-1 (1A lanciato in orbita il 3 aprile 2014 e 1B lanciato in orbita il 26 aprile 2016) rispetto ai satelliti dell'Agenzia Spaziale Canadese - Radarsat-2 - i cui dati sono stati utilizzati nell'aggiornamento 2011-2016 della cartografia regionale di subsidenza;
- medesima risoluzione media dei dati interferometrici Sentinel-1 di 20x5 metri, come quella dei dati Radarsat-2 del monitoraggio 2011-2016;
- copertura dell'intero territorio regionale, sia di pianura che collinare e montano, con solo dati Sentinel-1;
- copertura dell'intero periodo temporale 2016-2021 con solo dati Sentinel-1;
- frequenza di monitoraggio più elevata considerando il minore tempo di rivisitazione di Sentinel-1 rispetto Radarsat-2;
- elaborazione in doppia geometria, sia ascendente sia discendente, in modo da analizzare nel dettaglio anche i movimenti orizzontali;
- accesso libero e gratuito dei dati SAR della costellazione Sentinel-1.

2. Analisi interferometrica nel periodo 2016-2021

L'aggiornamento al 2021 delle conoscenze sui movimenti verticali del suolo del territorio di pianura dell'Emilia-Romagna, e per la prima volta anche in quello collinare e montano, è stato effettuato utilizzando la tecnica SqueeSAR™ per l'analisi dei dati radar, acquisiti per la prima volta in doppia geometria, sia ascendente sia discendente, utilizzando i dati dalla costellazione dei satelliti Sentinel-1 (SNT) nel periodo 2016-2021. Le attività svolte in successione sono di seguito elencate:

- verifica della effettiva disponibilità per l'intero territorio regionale delle immagini SAR relative al periodo 2016-2021, definizione e preparazione dei siti di elaborazione;
- elaborazione SqueeSAR™ dei singoli siti di elaborazione e restituzione delle velocità medie nel periodo lungo la linea di vista del Satellite (LOS);
- verifica dei risultati, allineamento a scala regionale e calcolo delle velocità medie di spostamento secondo le componenti verticale e orizzontale (pre-calibrazione);
- elaborazione dei dati acquisiti da 36 stazioni permanenti GNSS (*Global Navigation Satellite System*), ritenute significative e ubicate all'interno e nelle aree limitrofe del territorio regionale e inquadramento delle stazioni GNSS nel Sistema Internazionale EUREF, alle quali si aggiungono altre 7 stazioni GNSS utilizzate per le verifiche post-calibrazione;
- calibrazione dell'analisi interferometrica utilizzando le sole stazioni GNSS ubicate nel territorio regionale, pari complessivamente a 21 stazioni GNSS delle 36 complessivamente elaborate;
- verifiche post calibrazione tramite l'utilizzo delle ulteriori 7 stazioni GNSS;
- validazione dei dati interferometrici e analisi degli outlier;
- realizzazione della cartografia delle velocità medie di movimento verticale del suolo e delle differenze rispetto ai dati del periodo precedente di monitoraggio.

L'area di indagine comprende pertanto l'intero territorio dell'Emilia-Romagna, con un'estensione totale dell'area di oltre 22.000 km², dove sono stati individuati 2 siti di elaborazione dei dati interferometrici denominati "OVEST" ed "EST" (Figura 2.1).

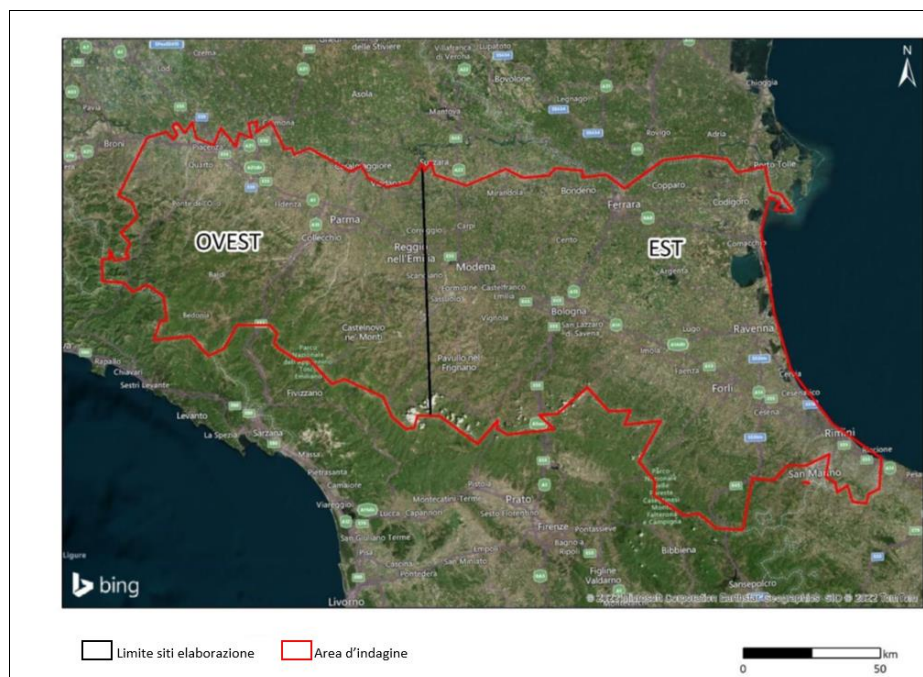


Figura 2.1: Estensione dell'area d'indagine (in rosso) e limite dei siti di elaborazione (in nero).

2.1 Dati satellitari acquisiti e preparazione dei siti di elaborazione

Le immagini elaborate per l'aggiornamento dei dati al 2021 sono state acquisite per i due siti di elaborazione dai satelliti Sentinel-1 (SNT) in entrambe le geometrie, ascendente e discendente, in banda C con lunghezza d'onda (λ) del segnale radar pari a 5,93cm per il periodo 2016 – 2021.

Considerando che i satelliti acquisiscono le immagini della superficie terrestre lungo una linea di vista (*Line Of Sight*) inclinata rispetto alla verticale di un angolo variabile da sensore a sensore e dato il moto combinato della rotazione terrestre e del satellite lungo l'orbita, per coprire l'intero territorio dell'Emilia-Romagna sono state acquisite immagini lungo 4 differenti tracks, due per geometria ascendente e due per quella discendente (Figure 2.2 e 2.3).

La consistenza dei *dataset* oggetto di elaborazione dei due siti è riportata in Tabella 2.1, dove sono descritte le tracks, il numero complessivo di immagini elaborate, l'intervallo di acquisizione e l'angolo di incidenza Θ per ogni dataset analizzato. La distribuzione temporale per le due aree di riferimento OVEST ed EST copre l'intero periodo da Gennaio 2016 a Giugno 2021.

Tutte le misure di spostamento sono riferite spazialmente ad un punto a terra, di coordinate note, preso come riferimento (reference point, REF) e risultano dunque relative e non assolute. Il REF viene scelto in fase di elaborazione su base statistica, tale da mantenere una stabilità di ampiezza e fase in tutto il dataset analizzato.

Data la vasta area di interesse e la presenza di campi di acquisizione in sovrapposizione, TRE ALTAMIRA ha implementato nell'analisi dei dati interferometrici una tecnica di processamento a larga scala chiamato *Wide Area*. L'area è stata suddivisa in diverse zone chiamate *lands* a seconda della copertura e consistenza delle immagini su tali regioni, ed è stato poi rimosso il contributo atmosferico sull'intera area di indagine.

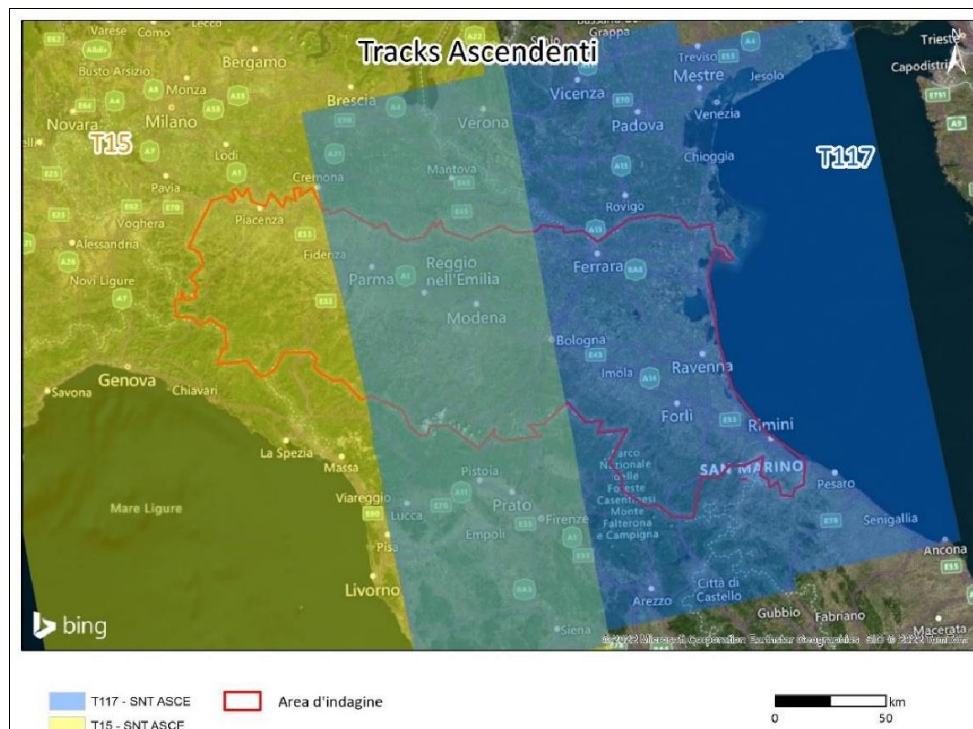


Figura 2.2: Copertura delle immagini SNT disponibili per l'Emilia-Romagna in geometria ascendente.



Figura 2.3: Copertura delle immagini SNT disponibili per l’Emilia-Romagna in geometria discendente.

Tabella 2.1 – Consistenza e caratteristiche dei dataset SNT dei siti elaborati

Sito	Track	Geometria	Angolo di incidenza Θ	# Immagini	Periodo di acquisizione	Numero MP (Measurement Points)
OVEST	T15	Ascendente	41°	288 - 293	17/01/2016-25/06/2021	2.084.480
	T168	Discendente	37°	306 - 307	16/01/2016-30/06/2021	2.126.461
EST	T117	Ascendente	39°	307	12/01/2016-26/06/2021	4.331.705
	T95	Discendente	40°	297 - 301	11/01/2016-25/06/2021	5.012.631
Numero totale di punti di misura (MP)						13.555.277

2.2 Risultati dell’analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione

Le analisi SqueeSAR™ condotte sui due siti di elaborazione hanno permesso di ottenere un totale di 13.555.277 MP (Measurement Points) per l’intero territorio dell’Emilia-Romagna (vedi Tabella 2.1 e Figura 2.4). A ciascun punto di misura sono associati una serie di attributi, tra cui la velocità media di spostamento (mm/anno) nel periodo monitorato 2016-2021 e la serie storica di spostamento in millimetri lungo la linea di vista del satellite, registrata ad ogni rivisitazione del punto di misura da parte del satellite stesso.

Le elaborazioni condotte per 4 track, due per ogni sito e per ciascuna geometria, sono state successivamente allineate tra loro e portate nel sistema geodetico-cartografico UTM-WGS84 (fuso 32).

Come noto, la distribuzione dei punti di misura dipende principalmente dalle caratteristiche di riflettività del suolo, e in particolare le massime densità di punti di misura si ottengono in corrispondenza delle zone urbanizzate, nei centri abitati e in corrispondenza delle infrastrutture antropiche, mentre nelle aree coltivate e/o vegetate la densità dei punti di misura risulta in genere molto più bassa. Le misure di spostamento, come già detto, sono rilevate lungo la linea di vista del

satellite (LOS - *Line of Sight*) e sono riferite ad un punto di riferimento (REF) indipendente per ogni sito elaborato. Come già ricordato, il REF viene scelto in fase di elaborazione su base statistica e deve essere tale da mantenere una stabilità di ampiezza e fase in tutto il dataset analizzato. In un primo step, il processamento adotta più REF locali per poi uniformare l'intero dataset su un solo REF consistente per l'intera regione.

Di ogni *track* elaborata è stato fornito uno *Shapefile* contenente le informazioni di velocità (VEL: mm/anno), quota (HEIGHT: m), serie storiche e parametri di qualità di tutti i MP individuati nell'analisi. Si ricorda inoltre che i dati SqueeSAR™ sono associati a due indici di precisione: la deviazione standard della velocità media di spostamento e la coerenza temporale.

La **deviazione standard** (V_STDEV) per definizione è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata spesso con σ) è solitamente utilizzata per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure. Ipotizzando infatti di conoscere la deviazione standard e supponendo una distribuzione normale degli errori (gaussiana), il 95% dei valori tende ad essere incluso nell'intervallo $\pm 2\sigma$ rispetto il valore medio. Nel caso di analisi SqueeSAR™ la deviazione standard si riferisce alla velocità media dei punti di misura rispetto al punto di riferimento. La deviazione standard dipende da diversi fattori, in particolare la distanza fisica dal REF, la qualità radiometrica del punto di misura, il numero di immagini elaborate, nonché la lunghezza dell'intervallo analizzato e la continuità temporale di acquisizione delle immagini.

La **coerenza temporale** (COHERENCE) è un indice che misura quanto bene il moto stimato segue un modello analitico. Le serie temporali delle analisi SqueeSAR™ vengono confrontate con modelli di tipo polinomiale e sinusoidale. Ogni serie temporale di movimento viene confrontata con il modello, il risultato del confronto è l'indice detto coerenza temporale. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna coerenza - il punto non ha nessuna attinenza con il modello utilizzato ed è quindi inaffidabile) ed 1 (massima coerenza). Il valore 1 assume il significato che ogni misura contenuta nella serie temporale è perfettamente giustificata dal modello matematico, ed è ovviamente un caso limite molto difficilmente riscontrabile.

In Tabella 2.2 sono riportati i valori medi di deviazione standard e coerenza ottenuti per i due siti. Si noti che tutti i valori medi di deviazione standard sono compresi entro 1 mm/anno, ad indicare l'ottima precisione delle misure ottenute.

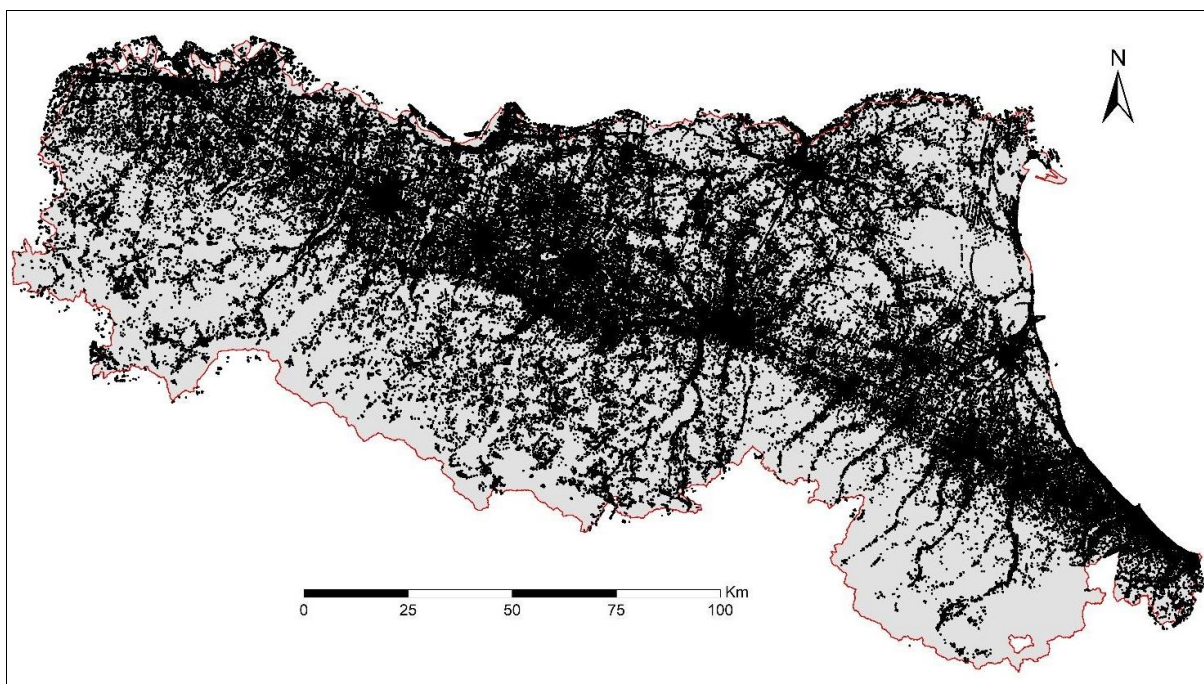


Figura 2.4: Distribuzione dei punti di misura SNT risultanti dall'analisi interferometrica (vedi Tabella 2.1).

Tabella 2.2 - Valori medi di deviazioni standard della velocità media e coerenza temporale delle misure in singola geometria.

Sito	Track	V_STDEV Media (mm/anno)	COHERENCE Media
EST	T117	0,3	0,82
	T95	0,2	0,83
OVEST	T15	0,3	0,82
	T168	0,2	0,82

2.2.1 Sito di elaborazione OVEST

Su questo sito sono stati individuati 4.210.941 punti di misura (MP), con una densità media di 255 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.5.

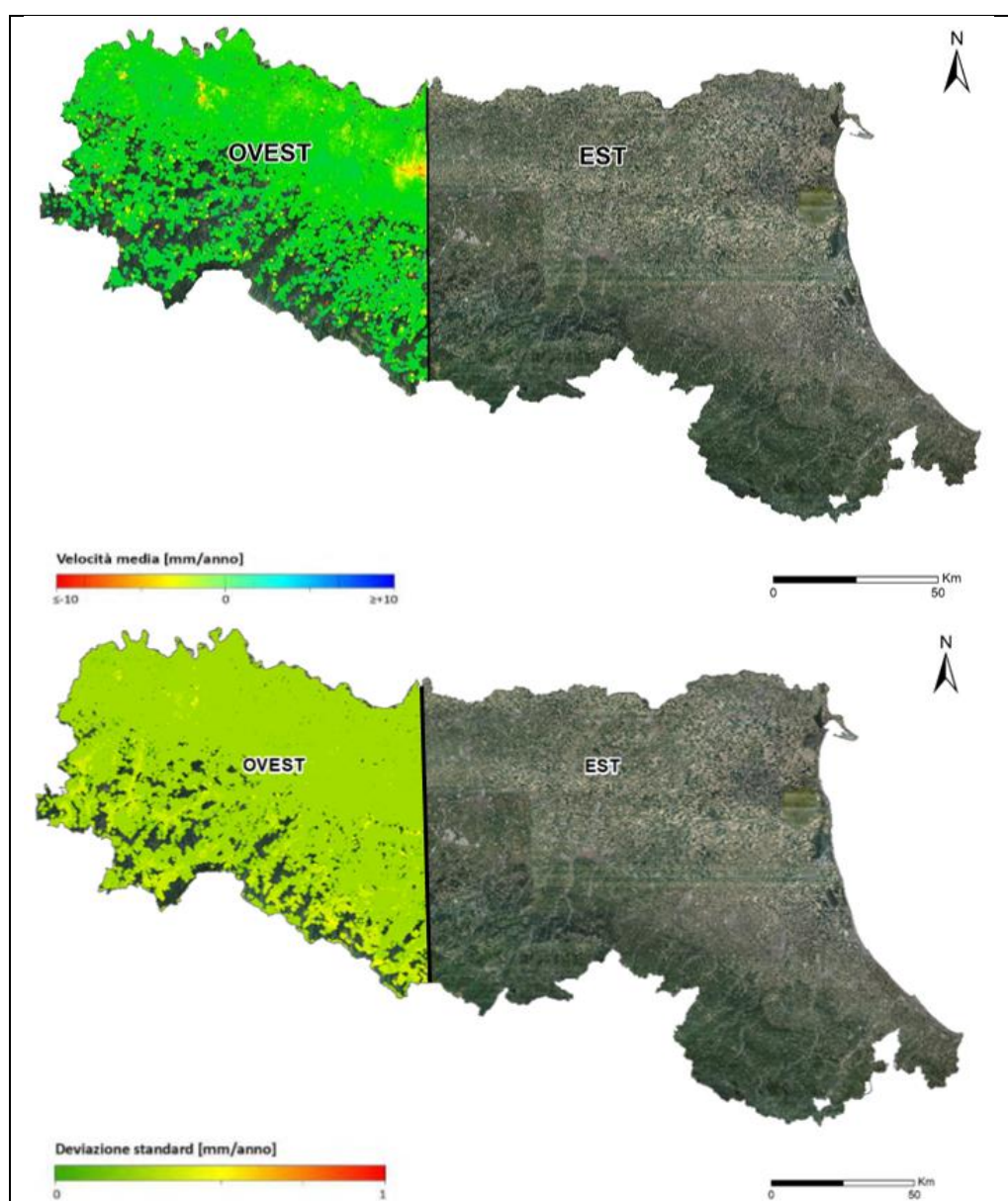


Figura 2.5: Velocità media annua e relativa deviazione standard dei punti individuati con l'elaborazione del sito OVEST.

2.2.2 Sito di elaborazione EST

Su questo sito sono stati individuati 9.344.336 punti di misura (MP), con una densità media di 336 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.6.

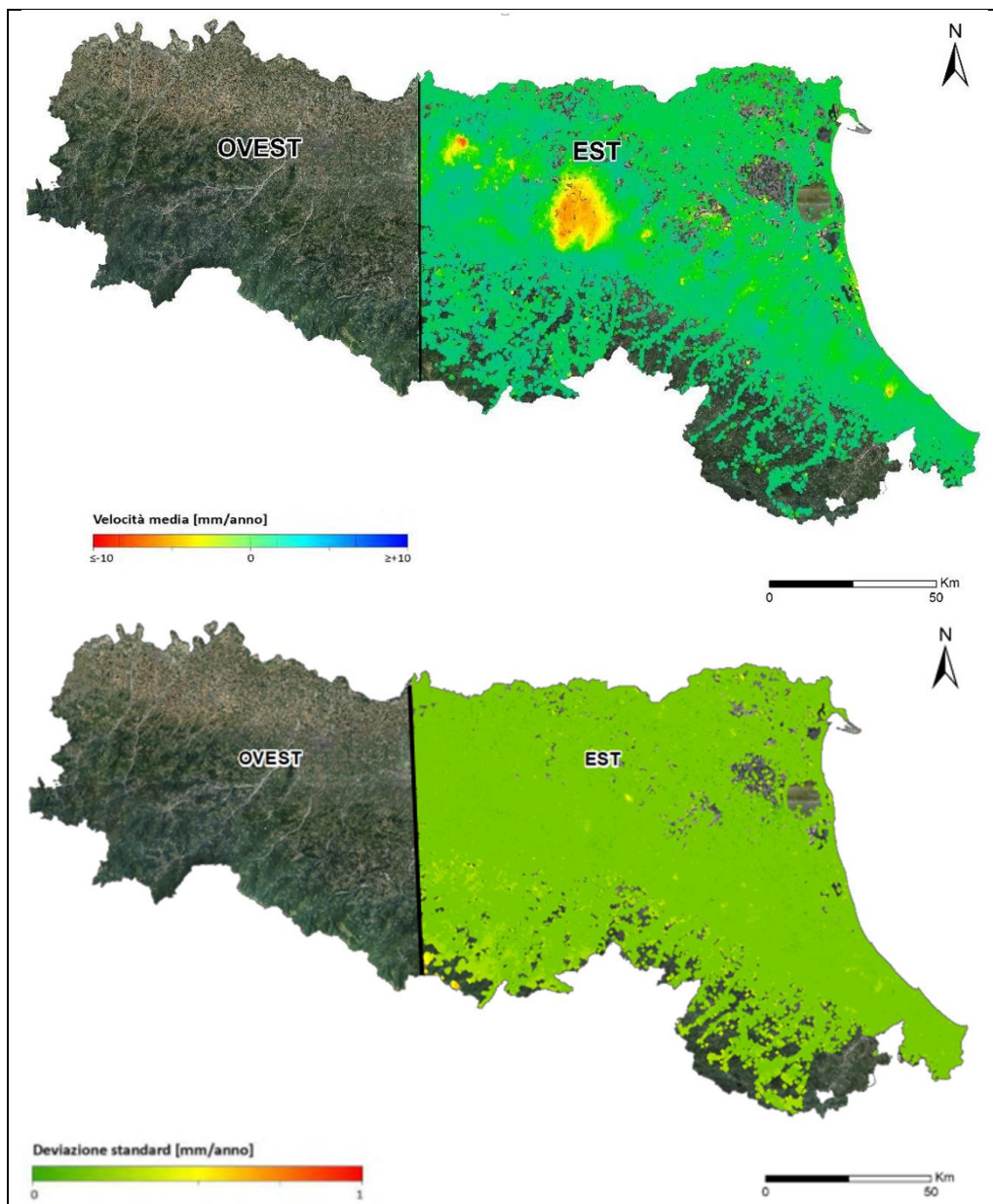


Figura 2.6: Velocità media annua e relativa deviazione standard dei punti individuati con l'elaborazione del sito EST.

2.3 Dati disponibili per territorio provinciale

I risultati dell'analisi interferometrica sono presentati di seguito per ambito territoriale provinciale, sia come velocità media, sia come deviazione standard della velocità, attraverso la distribuzione planimetrica su base GIS, mediante relativa classificazione in scala di colori. Si ricorda che la

deviazione standard associata alla velocità di movimento di un bersaglio radar è legata alla distanza fisica tra il punto considerato ed il riferimento scelto per la *track*, alla qualità del punto di misura (coerenza di fase) e alla qualità della stima della componente atmosferica.

2.3.1 Dati interferometrici in provincia di Piacenza

Nel territorio provinciale di Piacenza sono stati individuati 65.533 punti di misura (MP), con una densità media di 25 MP/Km² considerando sia la zona di pianura sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.7.

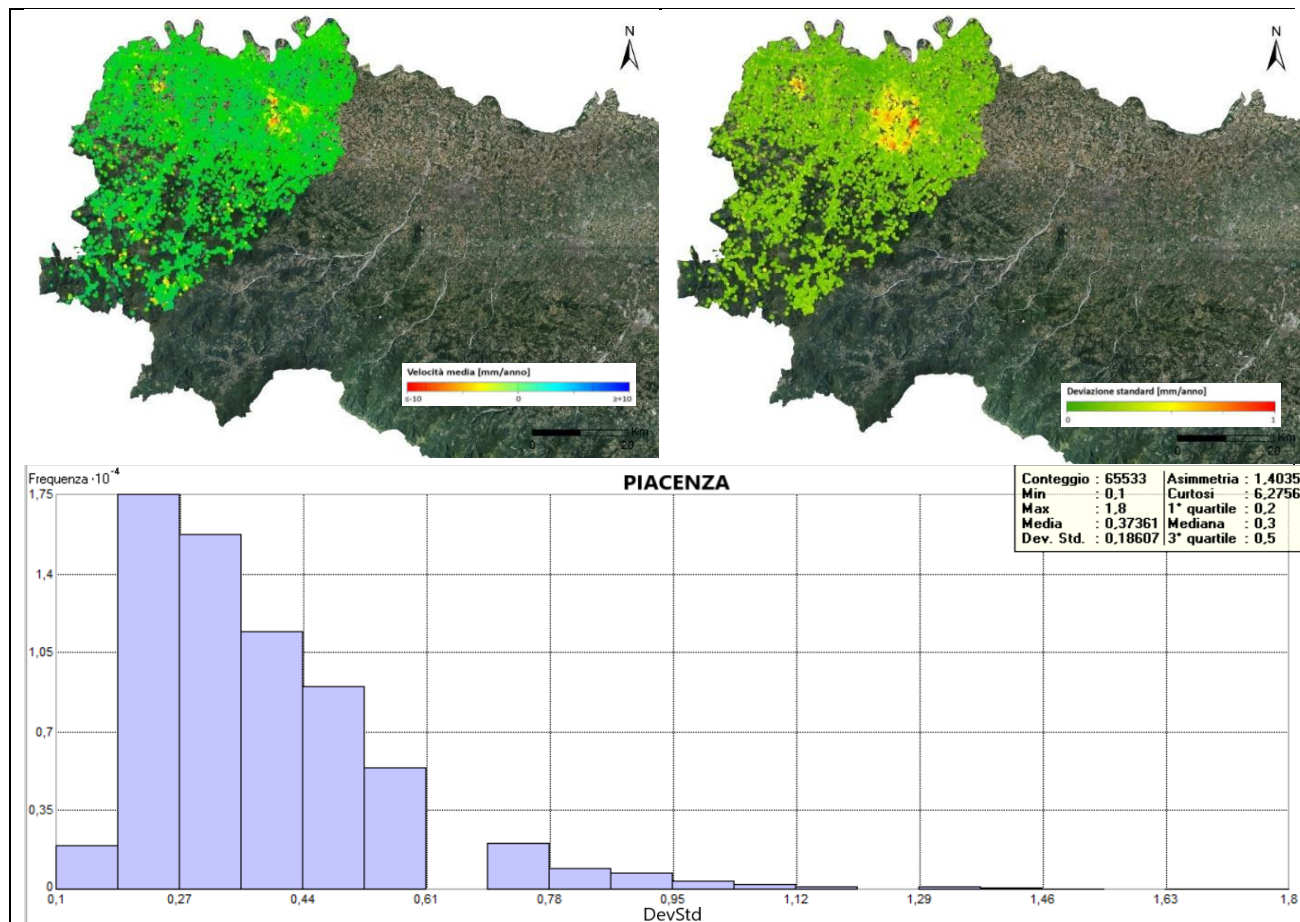


Figura 2.7: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Piacenza.

2.3.2 Dati interferometrici in provincia di Parma

Nel territorio provinciale di Parma sono stati individuati 81.554 punti di misura (MP), con una densità media di 24 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.8.

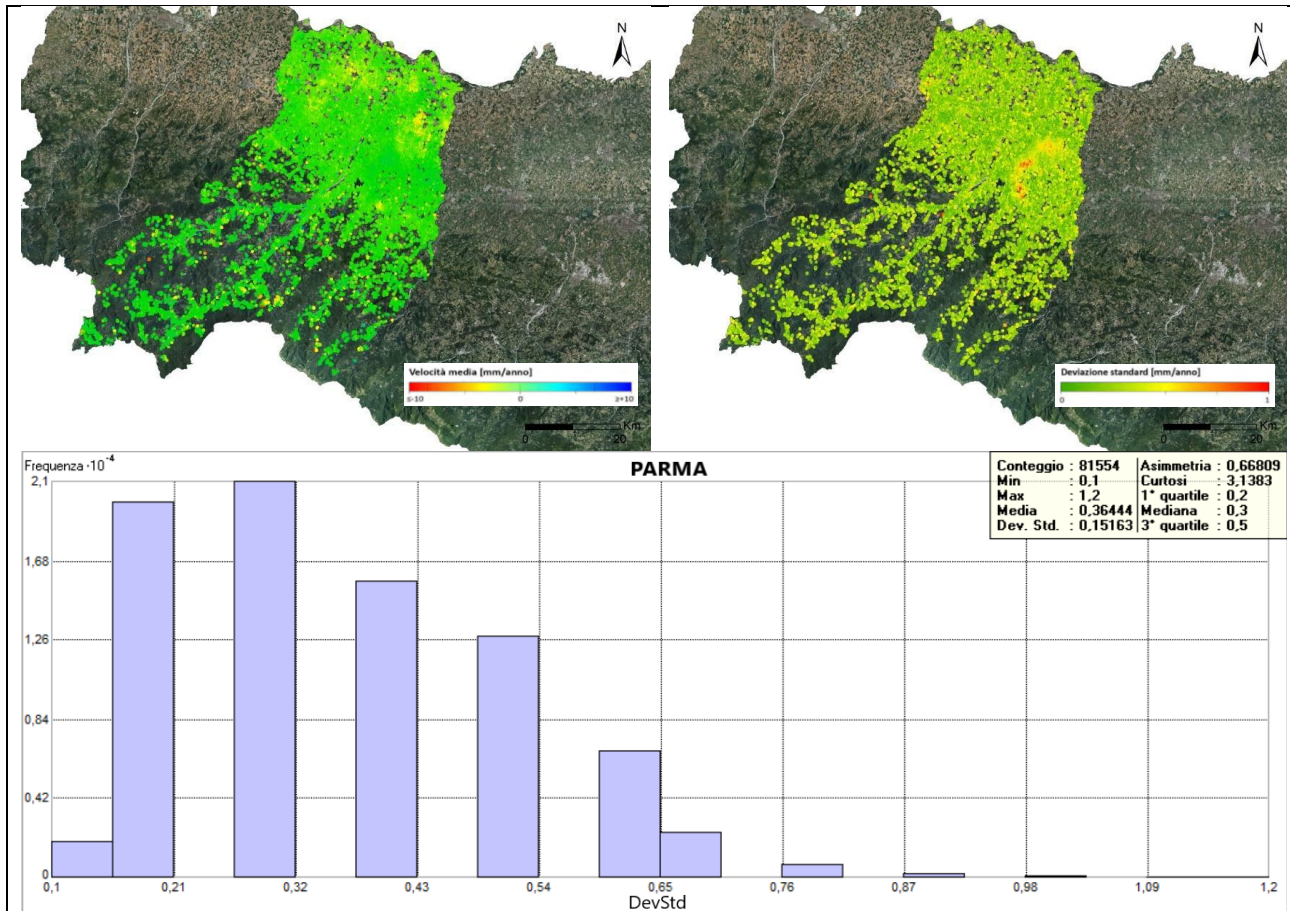


Figura 2.8: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Parma.

2.3.3 Dati interferometrici in provincia di Reggio Emilia

Nel territorio provinciale di Reggio Emilia sono stati individuati 87.726 punti di misura (MP), con una densità media di 38 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.9.

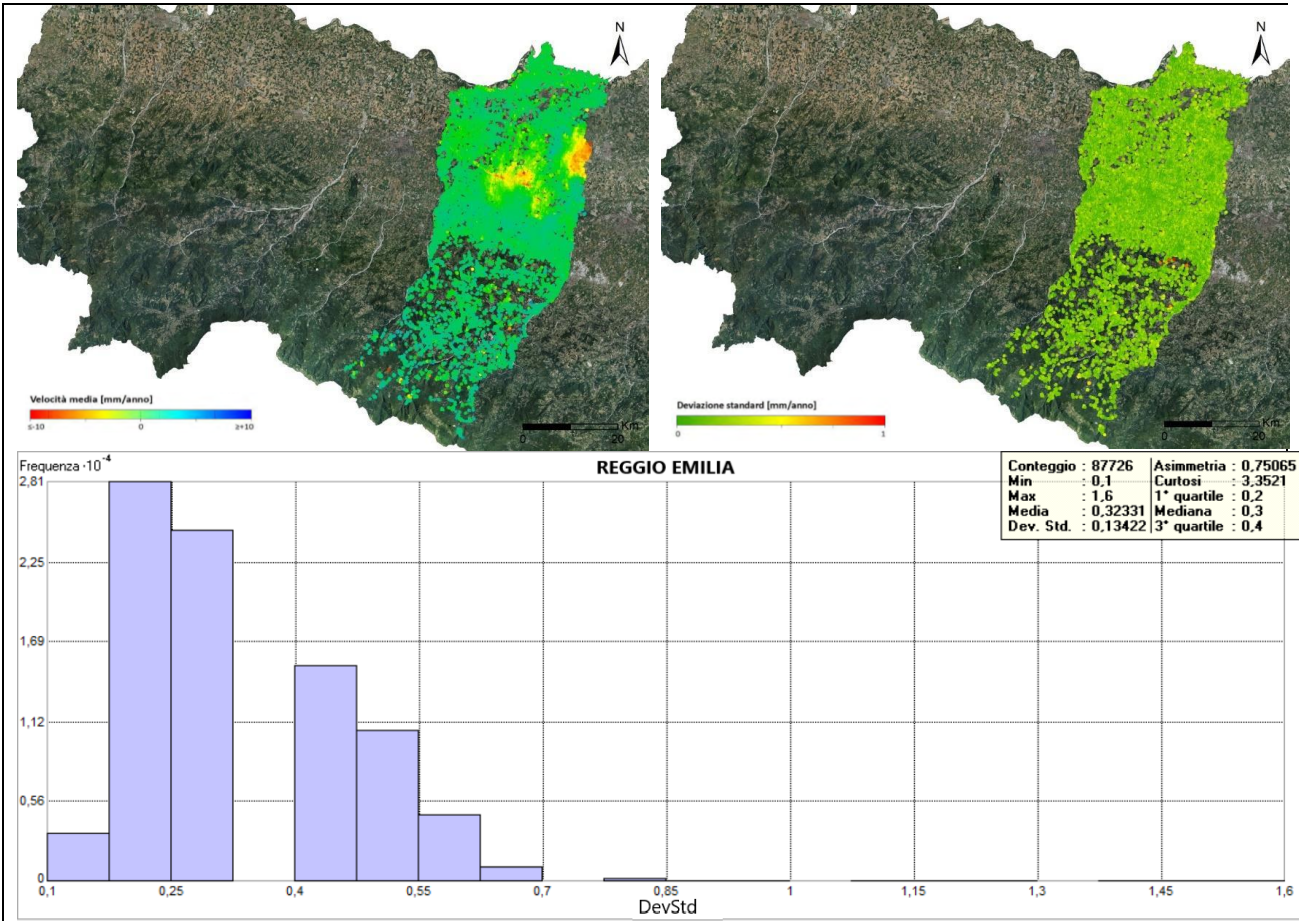


Figura 2.9: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Reggio Emilia.

2.3.4 Dati interferometrici in provincia di Modena

Nel territorio provinciale di Modena sono stati individuati 100.115 punti di misura (MP), con una densità media di 37 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.10.

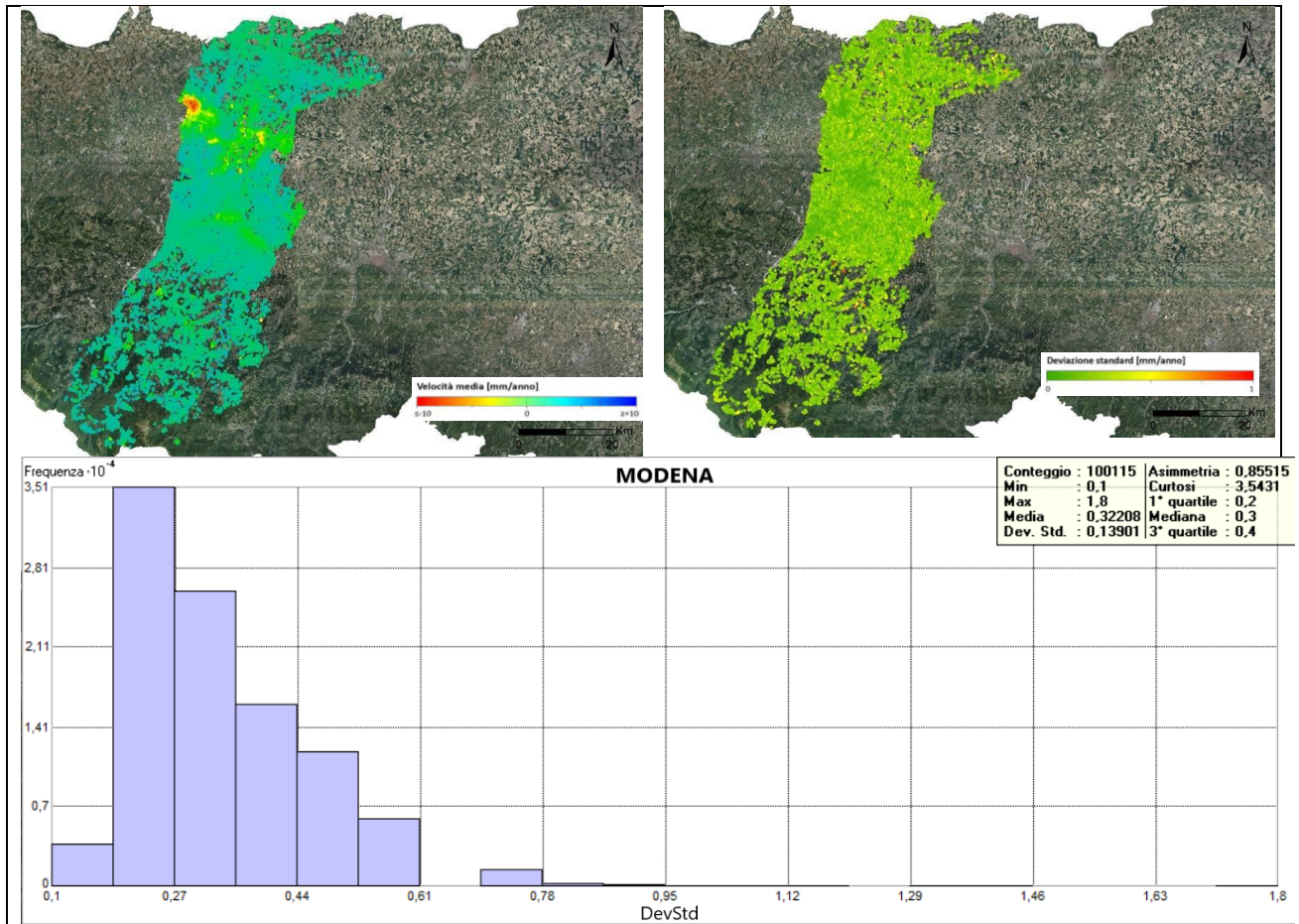


Figura 2.10: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Modena.

2.3.5 Dati interferometrici in provincia di Bologna

Nel territorio provinciale di Bologna sono stati individuati 115.051 punti di misura (MP), con una densità media di 37 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.11.

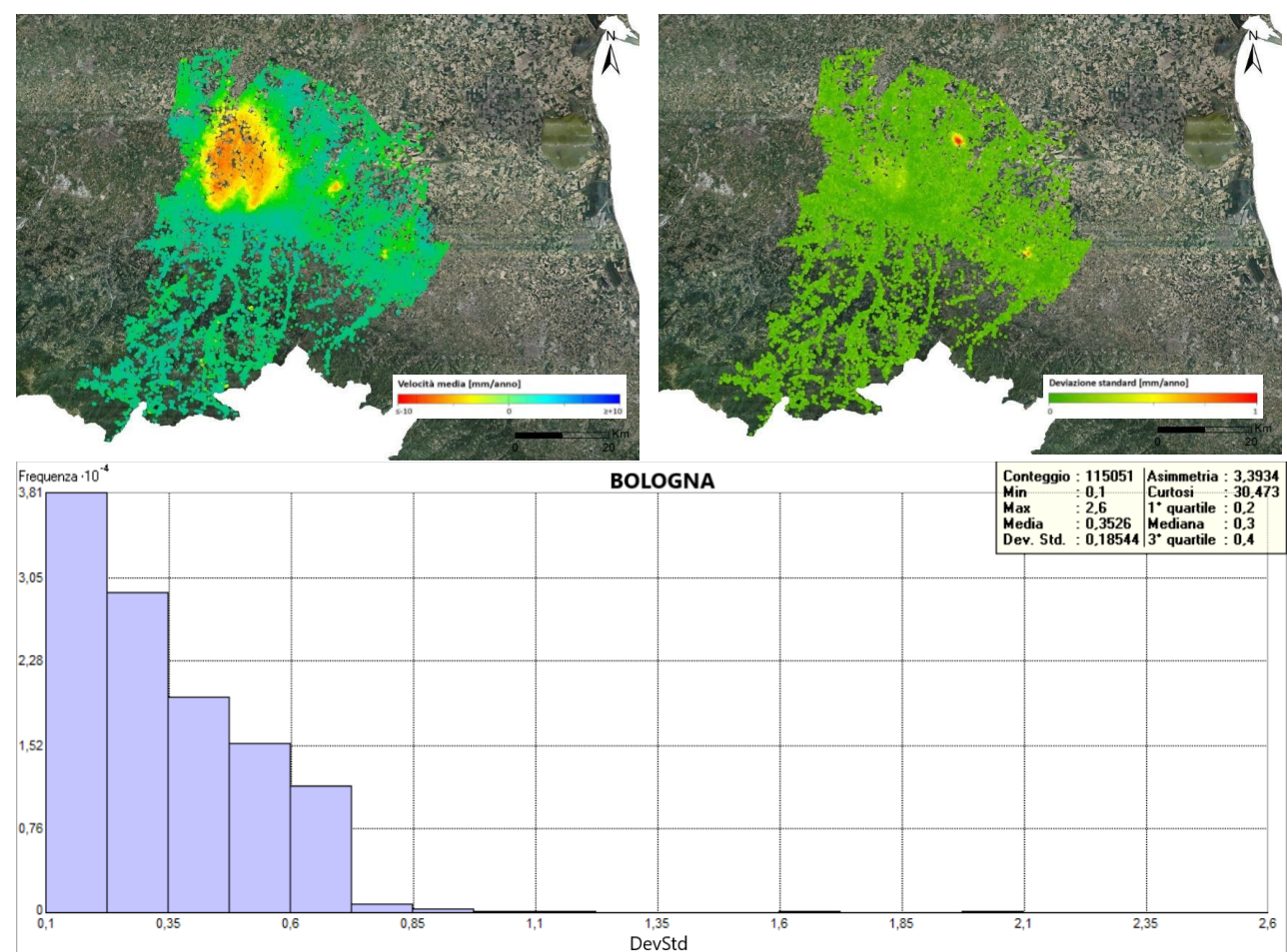


Figura 2.11: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Bologna.

2.3.6 Dati interferometrici in provincia di Ferrara

Nel territorio provinciale di Ferrara sono stati individuati 67.882 punti di misura (MP), con una densità media di 26 MP/Km² considerando che sono tutti in zona di pianura. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.12.

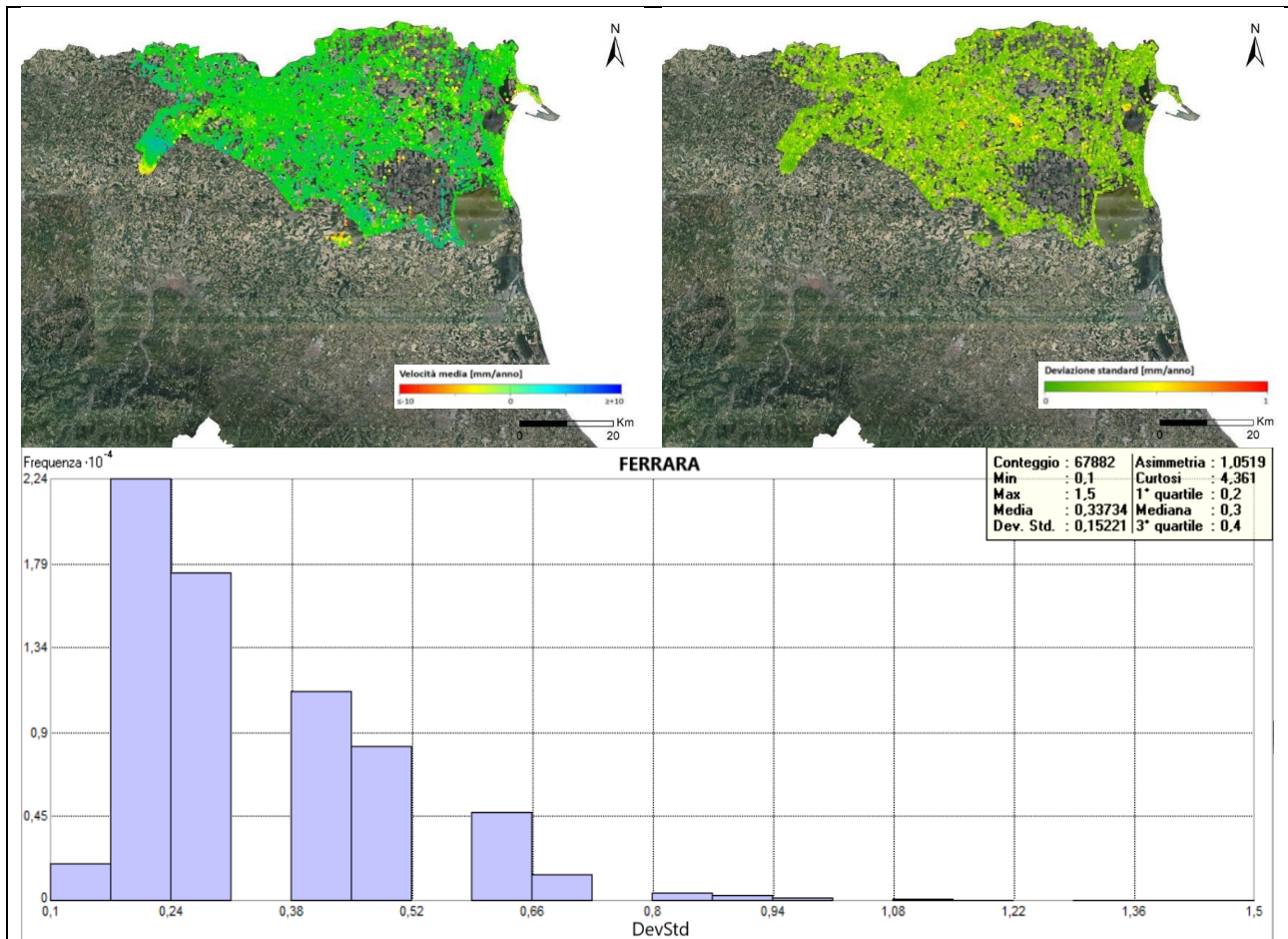


Figura 2.12: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Ferrara.

2.3.7 Dati interferometrici in provincia di Ravenna

Nel territorio provinciale di Bologna sono stati individuati 64.898 punti di misura (MP), con una densità media di 35 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.13.

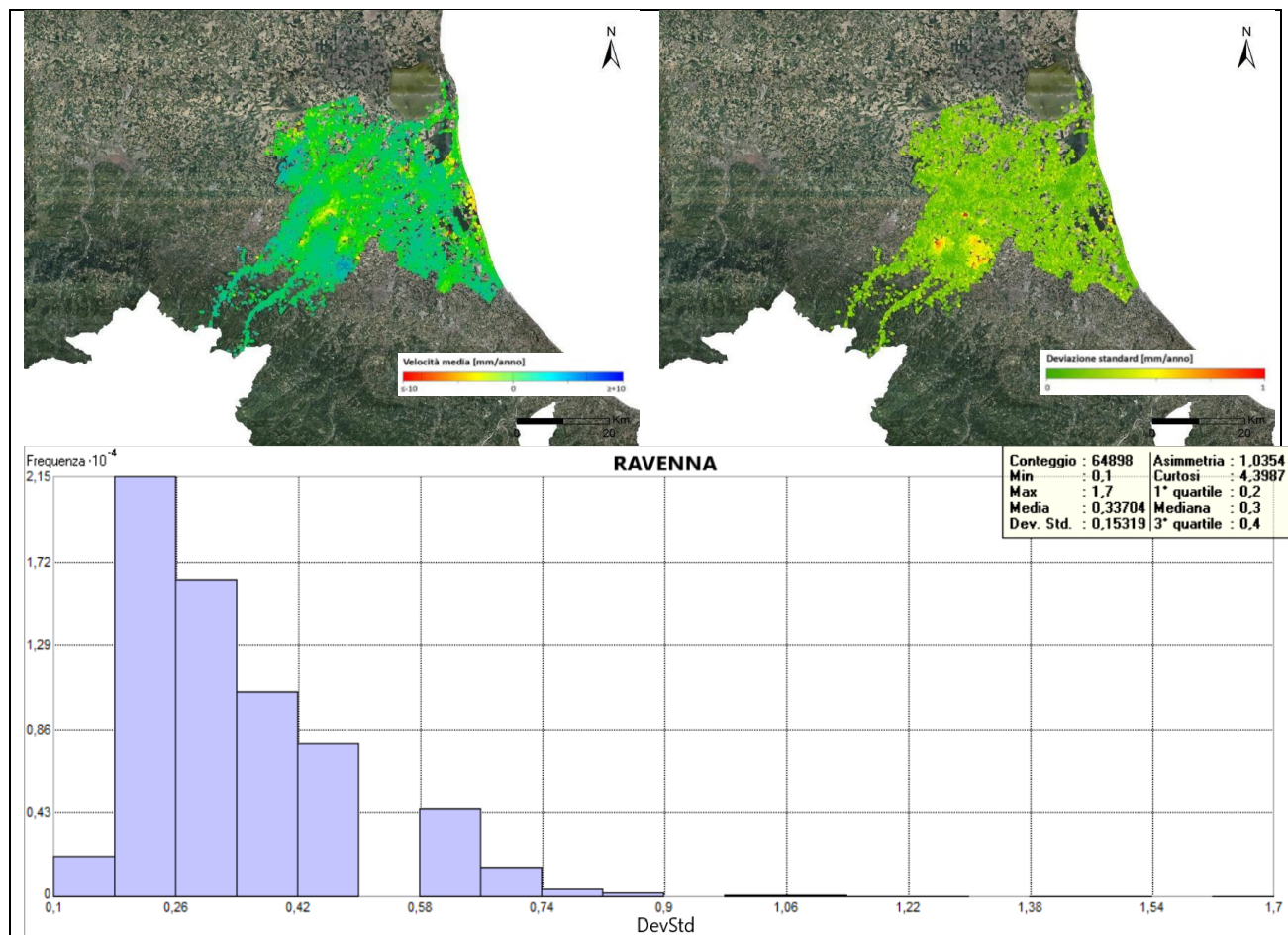


Figura 2.13: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Ravenna.

2.3.8 Dati interferometrici in provincia di Forlì-Cesena

Nel territorio provinciale di Forlì-Cesena sono stati individuati 58.513 punti di misura (MP), con una densità media di 25 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.14.

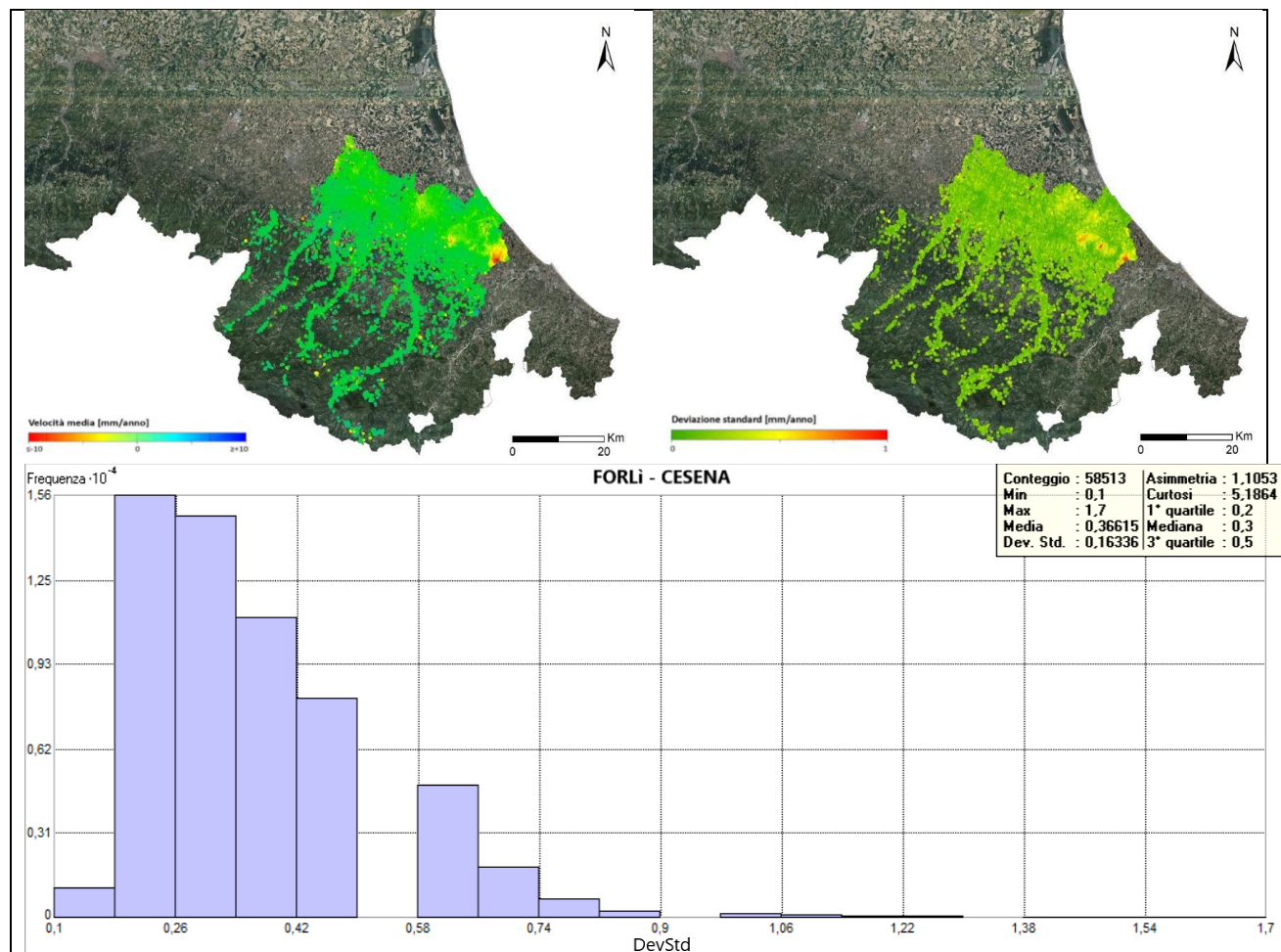


Figura 2.14: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Forlì-Cesena.

2.3.9 Dati interferometrici in provincia di Rimini

Nel territorio provinciale di Rimini sono stati individuati 37.495 punti di misura (MP), con una densità media di 43 MP/Km² considerando sia la zona di pianura, sia la zona collinare e montana. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 2.15.

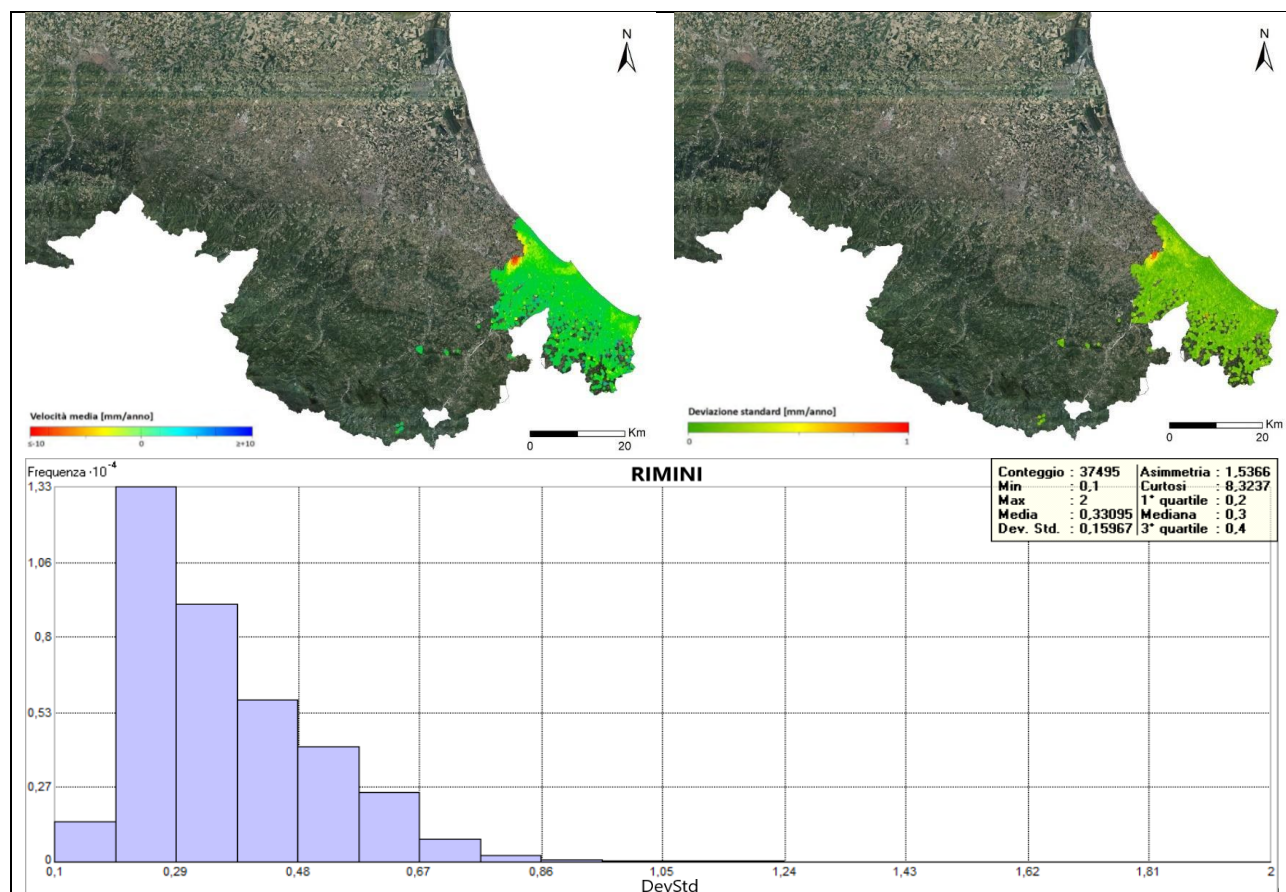


Figura 2.15: Velocità media annua (in alto a sinistra), deviazione standard (in alto a destra) e relativa distribuzione statistica (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione in provincia di Rimini.

2.4 Verifica dei risultati, allineamento a scala regionale e calcolo delle velocità medie di spostamento (pre-calibrazione)

Al fine di preparare i dati per la successiva fase di calibrazione tramite l'elaborazione di stazioni permanenti GNSS, sfruttando le aree di sovrapposizione tra le varie track di acquisizione (OVEST ed EST), si è proceduto a verificare la coerenza tra i due siti elaborati separatamente e, successivamente, allineare in termini di velocità l'intero dataset costituito da oltre 13 milioni di punti di misura (MP) acquisiti in orbita ascendente e discendente. Sebbene ogni sito corrisponda ad un'elaborazione indipendente, ciascuna con un proprio punto di riferimento, questa procedura di confronto e allineamento permette di selezionare punti di riferimento che minimizzino le differenze di velocità media tra i siti.

L'attributo che caratterizza la qualità del dato è la coerenza (COHERENCE): indice espresso tra un minimo pari a 0 ed un massimo pari ad 1, funzione dell'adattamento tra il modello di spostamento e la serie storica misurata sul punto (vedi paragrafo 2.2). E' prassi consolidata (Mora *et al.*, 2003) quella

di scegliere di elaborare i dati con indice di qualità pari o maggiore di 0,70. Nel caso in oggetto questa selezione porta a considerare un totale di 12.713.649 punti (Tabella 4.6).

Tabella 4.6: Numero dei Punti di Misura iniziali e quelli con coerenza pari o superiore a 0,7.

ID	TRACK	Geometria	PS/DS iniziali	COHERENCE $\geq 0,70$
1	T117	Ascendente	4.331.705	4.059.388
2	T95	Discendente	5.012.631	4.706.705
3	T15	Ascendente	2.084.480	1.953.178
4	T168	Discendente	2.126.461	1.994.378
TOTALE			13.555.277	12.713.649

Al completamento di questa procedura i siti possono ritenersi riferiti ad un ipotetico unico punto di riferimento comune. La combinazione dei dataset SNT ascendenti e discendenti così allineati ha consentito la scomposizione del moto nella componente verticale e orizzontale (est-ovest), come illustrato nel par. 1.1.

I punti di misura (PS e DS) ascendenti e discendenti allineati ad un unico punto di riferimento comune hanno subito un'operazione di scomposizione del moto nelle due componenti: orizzontale e verticale. Contestualmente a tale operazione i punti di misura radar sono stati ri-campionati su un'unica griglia a passo regolare con maglia 50 x 50 m, composta quindi da pseudo-MP posizionati al centro della griglia (vedi paragrafo 2.4). Questa operazione ha costituito un passaggio indispensabile, in quanto le LOS delle due diverse geometrie individuano spesso bersagli a terra differenti e dunque il ri-campionamento è stato necessario per poter combinare le misure ottenute e calcolare le componenti verticali e orizzontali del movimento. Ciò ha di conseguenza ridotto notevolmente il numero di punti da analizzare nella componente di moto verticale e la corrispondente orizzontale ad un totale di 704.444 pseudo-MP, determinando in questo modo una perdita di risoluzione spaziale rispetto gli iniziali 13 milioni di punti di misura.

Nonostante ciò, il numero dei punti di misura nella zona di pianura è dello stesso ordine di grandezza del numero dei dati disponibili nei rilievi precedenti (2006-2011 e 2011-2016) a singola geometria, con il vantaggio però di disporre delle velocità di spostamento anche orizzontali oltre quelle verticali. I dati finali che ne derivano sono quindi da riferire non a specifici bersagli radar a terra, ma a pseudo-bersagli (pseudo-MP) posizionati su una griglia regolare di passo 50 m (Figura 2.16).

Le misure lungo la LOS fornite dai punti di misura localizzati dentro la stessa cella 50x50 m sono state quindi mediate e poi combinate per il calcolo della componente verticale ed est-ovest. Si precisa che le informazioni sulle due componenti del moto sono fornite per le sole celle contenenti punti di misura di entrambe le geometrie (ascendente e discendente), anche se i punti possono essere diversi nell'ambito della maglia stessa.

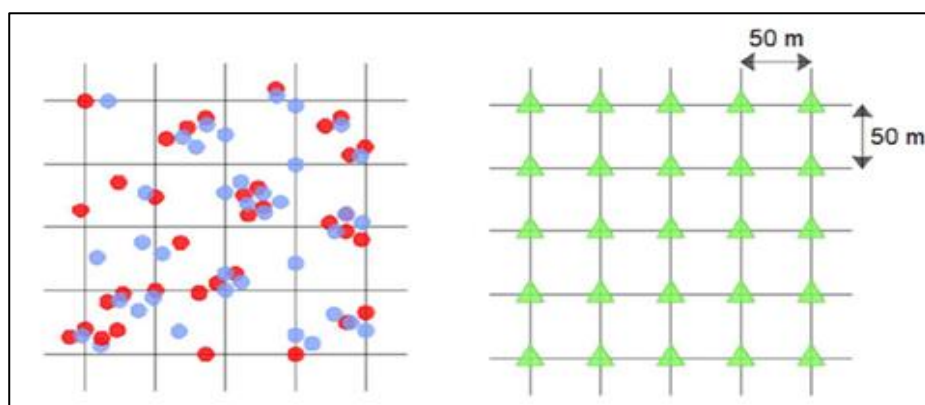


Figura 2.16: Ri-campionamento dei PS in doppia geometria (a sinistra) ad ottenere un grigliato regolare di punti (pseudo-PS o pseudo-MP) con maglia 50x50 m (a destra).

Le elaborazioni condotte a seguito dell'allineamento a scala regionale e l'attività di ri-campionamento dei MP su una griglia regolare, oltre ad escludere gli MP che hanno una coerenza $< 0,7$, hanno permesso di ottenere le componenti delle velocità medie verticale e orizzontale (est-ovest) nel periodo 2016-2021, prima di effettuare la calibrazione con i dati delle stazioni permanenti GNSS (Figure 2.17 e 2.18).

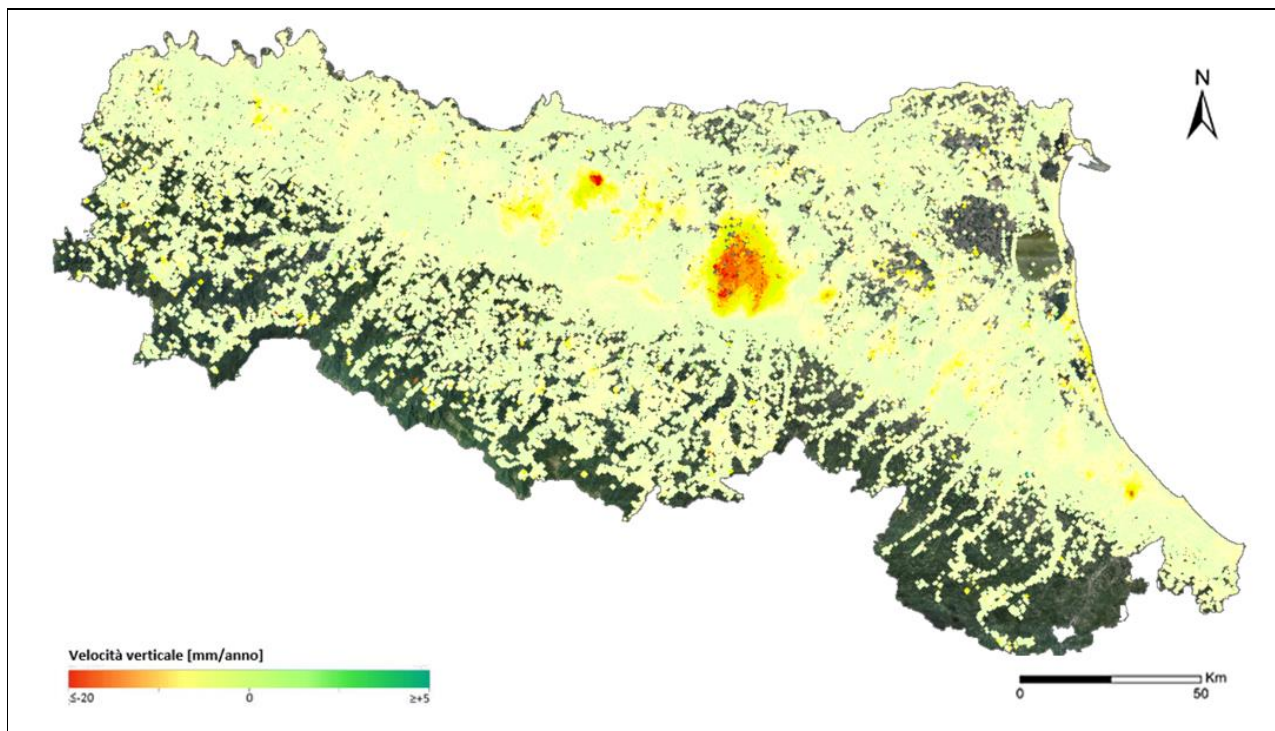


Figura 2.17: Velocità media annua di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 ottenuta con l'allineamento dei siti di elaborazione a scala regionale (pre-calibrazione).

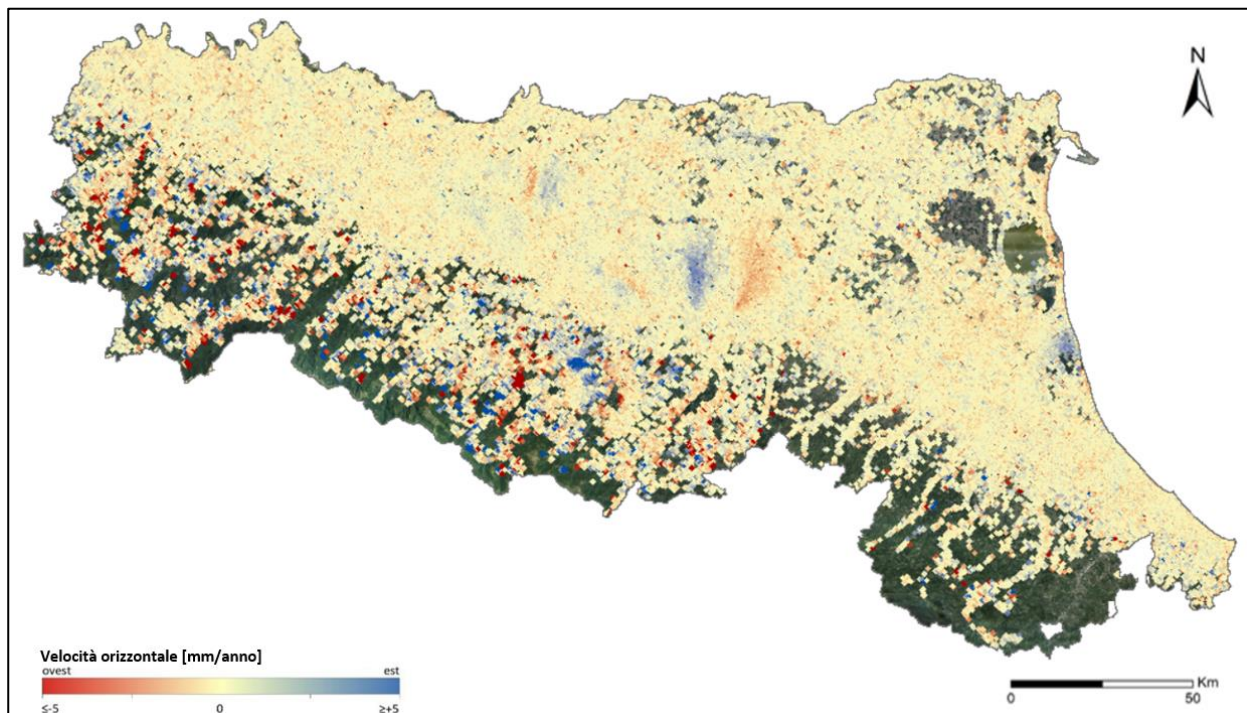


Figura 2.18: Velocità media annua di movimento orizzontale Est-Ovest del suolo nel periodo 2016-2021 ottenuta con l'allineamento dei siti di elaborazione a scala regionale (pre-calibrazione).

3. Analisi delle stazioni permanenti GNSS

Il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) è un sistema atto a definire una base temporale e di posizionamento globale all'interno di sistemi di riferimento internazionalmente riconosciuti. Per le sue caratteristiche il GNSS trova un largo impiego in campo topografico, ma grazie all'attivazione di stazioni in acquisizione permanente si rivela sempre più di interesse sia nelle attività tecniche topografiche in campo professionale, sia dal punto di vista scientifico, consentendo applicazioni di monitoraggio di alta precisione, essenziali per esempio nello studio della geodinamica e nel controllo delle deformazioni del suolo. La precisione delle variazioni delle coordinate tridimensionali nel tempo determinate per tali stazioni diviene molto elevata (alcuni decimi di mm/anno), ma è strettamente necessario che le acquisizioni siano effettuate per intervalli di tempo lunghi, almeno superiori a 2,5 anni al fine di considerare l'influenza degli effetti periodici stagionali (Blewitt & Lavallée, 2002).

Il calcolo delle posizioni giornaliere di stazioni GNSS in acquisizione permanente può avvenire secondo un approccio che fa uso di osservazioni differenziate oppure secondo un approccio che fa uso di osservabili indifferenziati. Entrambe le metodologie, implementate con software avanzati possono raggiungere precisioni analoghe nel calcolo delle soluzioni giornaliere (Ayhan & Almuslmani, 2021; Kouba & Hèroux, 2001; Zumberge et al., 1997). Una volta ottenuto il dato giornaliero, le serie temporali del posizionamento nelle tre componenti vengono analizzate per la stima della velocità nelle tre dimensioni. Per il presente lavoro è stato adottato l'approccio indifferenziato denominato *Precise Point Positioning (PPP)*, descritto al paragrafo 3.4.

3.1 Definizione della rete di inquadramento

Per consentire l'inquadramento della rete di stazioni permanenti poste in Emilia-Romagna entro l'*International Terrestrial Reference Frame (ITRF)* è stato inizialmente individuato un insieme di stazioni in acquisizione continua, appartenenti alla rete dell'*International GNSS Service (IGS)* e/o facenti parte del *IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF)* rispetto alle quali effettuare un riallineamento del calcolo mediante una strategia indifferenziata delle posizioni giornaliere delle stazioni incognite. Di tale insieme fanno parte le 20 stazioni geodetiche IGS/EUREF contraddistinte dalle sigle internazionali AJAC, GARI, GENO, GRAS, GRAZ, GRS1, LAMP, MOSE, MATE, (MEDI MSEL), NOT1, PAT0, SOFI, SRJV, TLSE, TORI, UNPG, WTZR, ZIMM (Figura 3.1).

Le acquisizioni giornaliere, effettuate con intervallo di campionamento di 30 secondi, sono state raccolte per le stazioni suddette nell'intervallo temporale 01/01/2016 – 31/12/2021. A questo archivio di dati (in formato RINEX) si sono aggiunte le acquisizioni delle effemeridi precise dei satelliti, le correzioni degli orologi, i modelli ionosferici globali IGS, i parametri di orientamento terrestre, le calibrazioni assolute delle antenne dei satelliti e dei ricevitori a terra nonché il modello di marea adattato alle posizioni delle stazioni analizzate. Inoltre, è stato necessario acquisire le coordinate di riferimento e le velocità (IGS2014) delle singole stazioni di riferimento associate alle eventuali discontinuità dovute a cambi nella configurazione strumentale e/o a modifiche dei manufatti di installazione dell'antenna.

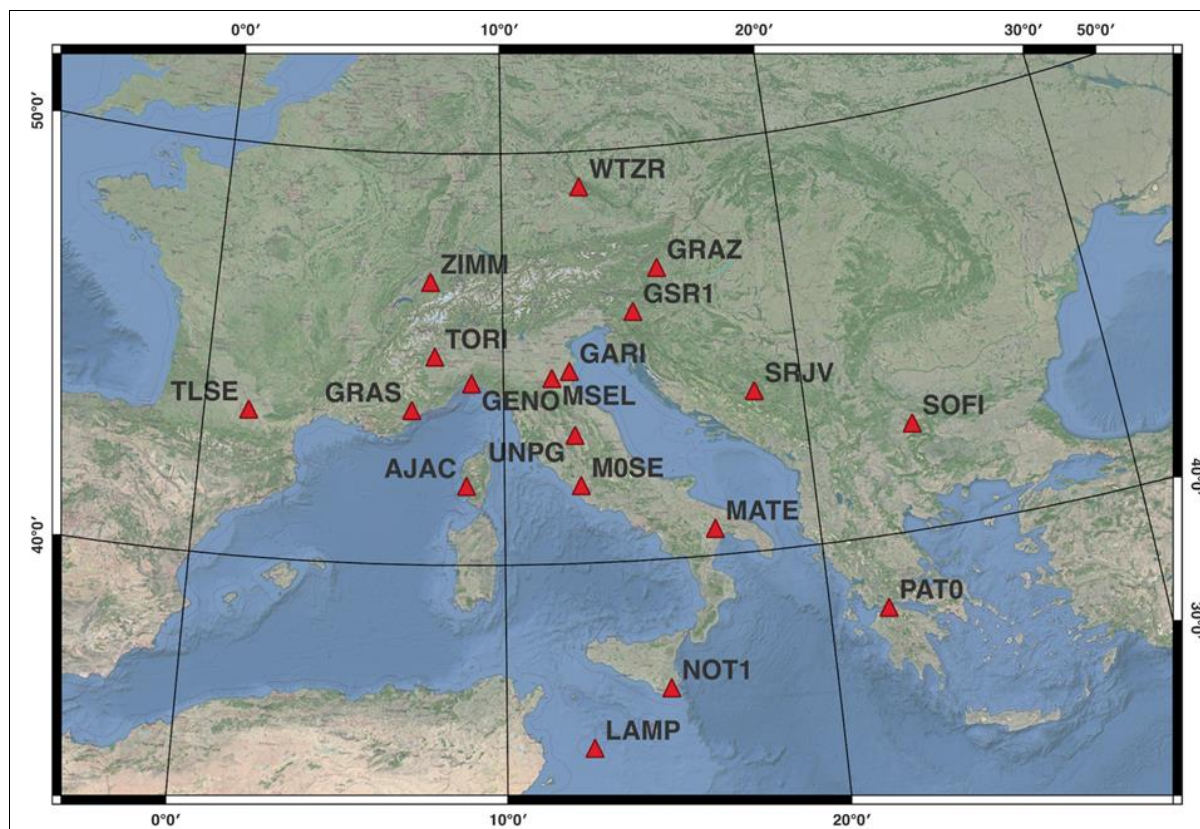


Figura 3.1: Stazioni appartenenti all'International GNSS Service (IGS) utilizzate per il calcolo di riallineamento delle soluzioni PPP.

3.2 Stazioni permanenti analizzate nel territorio dell'Emilia-Romagna

Dopo aver effettuato un preliminare censimento delle stazioni permanenti GNSS presenti nell'area oggetto d'indagine, sono state individuate le stazioni attive da almeno tre anni per le quali potessero essere disponibili le acquisizioni giornaliere con un intervallo di campionamento di 30 secondi (intervallo di tempo tra le epoche di acquisizione dei segnali di codice e di fase di ciascun satellite per le diverse portanti). Sono state così individuate 36 stazioni permanenti GNSS delle quali sono stati ottenuti e processati i dati grezzi di acquisizione in formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) (Figura 3.2); tra queste sono state selezionate 21 stazioni all'interno del territorio regionale dell'Emilia-Romagna, la cui descrizione e ubicazione è riportata in Tabella 3.1 e Figura 3.3, che sono servite per la definizione del *datum* di velocità dell'analisi interferometrica. Le 21 stazioni permanenti sono ubicate sia nell'area di pianura, sia nella zona collinare e montana, rispettivamente con 13 e 8 stazioni. Le 15 stazioni rimanenti e non considerate, sono state escluse dal calcolo per la calibrazione del dato InSAR in quanto 7 di queste non ricadevano entro i confini regionali e le restanti 8 presentavano una consistenza non ottimale a causa di alcune interruzioni nelle acquisizioni o per la presenza di evidenti fenomeni di periodicità su base stagionale non direttamente legati alla subsidenza regionale. Ciononostante, alcune di queste stazioni hanno fornito informazioni utili per verifiche a posteriori delle velocità medie calcolate.

Le 21 stazioni analizzate appartengono a diverse infrastrutture geodetiche:

- 2 stazioni fanno parte delle reti globali scientifiche IGS-EUREF;
- 8 stazioni sono appartenenti alla rete RING gestita dall'INGV, materializzata principalmente per studi di geodinamica attuale;
- 11 stazioni sono parte della rete di stazioni permanenti GNSS istituita dalla Fondazione dei Geometri e Geometri laureati della Provincia di Bologna – FOGER.

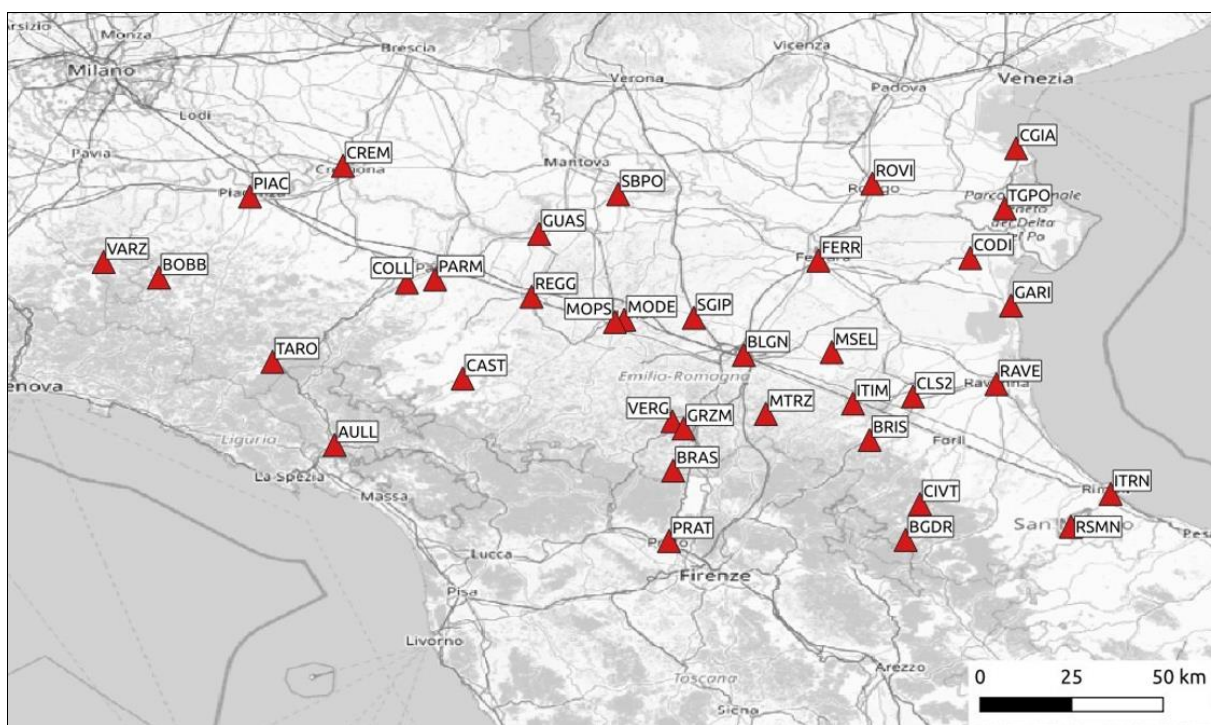


Figura 3.2 - Ubicazione delle 36 stazioni permanenti GNSS elaborate.

Tabella 3.1: Stazioni permanenti GNSS selezionate per la fase di calibrazione del dato InSAR, reti di appartenenza e coordinate geografiche.

ID	Stazione	Rete	Latitudine	Longitudine
1	BGDR	RING	43.889062	11.894963
2	BLGN	RING	44.510996	11.350575
3	BOBB	FOGER	44.770626	9.383442
4	BRAS	RING	44.122166	11.113084
5	BRIS	RING	44.224817	11.766047
6	CAST	FOGER	44.431633	10.405270
7	CODI	FOGER	44.836676	12.111974
8	FERR	FOGER	44.827857	11.601271
9	GARI	EUREF	44.676903	12.249437
10	GUAS	FOGER	44.917759	10.662288
11	ITIM	FOGER	44.347499	11.717932
12	MODE	RING	44.628953	10.948706
13	MSEL	EUREF	44.520034	11.646493
14	MTRZ	RING	44.312758	11.424984
15	PARM	RING	44.764571	10.312189
16	PIAC	FOGER	45.043151	9.689740
17	RAVE	FOGER	44.405296	12.191882
18	REGG	FOGER	44.706372	10.636853
19	SGIP	RING	44.635529	11.182719
20	TARO	FOGER	44.487859	9.765745
21	VERG	FOGER	44.287416	11.110521

Per le verifiche a posteriori dei risultati raggiunti con la calibrazione dei dati interferometrici, sono state utilizzate 7 stazioni permanenti GNSS (Tabella 3.2 e ubicazione in Figura 3.3), 3 delle quali (COLL, ITRN, MOPS) appartenenti alle 15 non scelte per la calibrazione, le ulteriori 4 stazioni sono state processate grazie ai dataset in formato RINEX resi disponibili successivamente alla fase di calibrazione dell'analisi InSAR (BOL1, BOLG, FIUN, SMAR).

Tabella 3.2: Stazioni permanenti GNSS utilizzate per ulteriori verifiche a posteriori del dato InSAR calibrato, reti di appartenenza e coordinate geografiche.

ID	Stazione	Rete	Latitudine	Longitudine
1	BOL1	UNIBO	44.487642	11.328857
2	BOLG	EUREF	44.500216	11.356774
3	COLL	FOGER	44.752813	10.215979
4	FIUN	ENI	44.397300	12.315900
5	ITRN	FOGER	44.048318	12.582076
6	MOPS	EUREF	44.629354	10.949195
7	SMAR	ENI	44.594400	12.247100

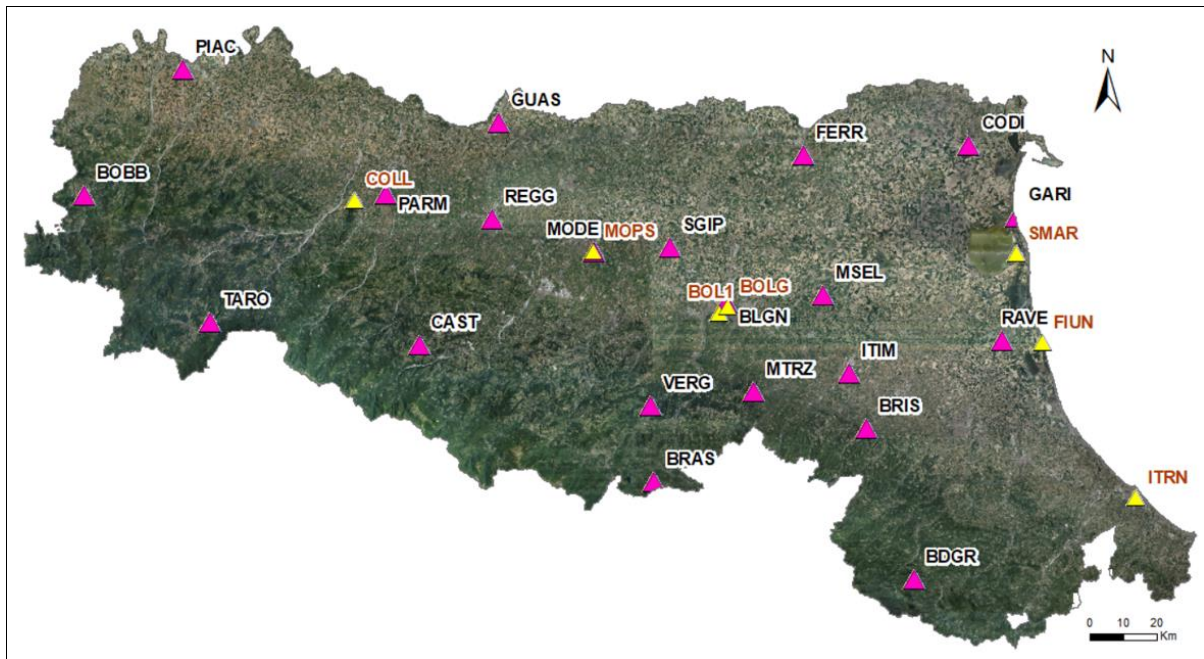


Figura 3.3 - Ubicazione delle 21 stazioni permanenti GNSS utilizzate per la calibrazione (triangoli colore fucsia) e delle 7 stazioni utilizzate per le verifiche a posteriori (triangoli colore giallo).

3.3 Elaborazione delle osservazioni giornaliere

La strumentazione GNSS di classe geodetica, installata in modo permanente presso i vertici da monitorare, permette la memorizzazione dei segnali provenienti dalla costellazione satellitare che vengono acquisiti dalle antenne poste in stazione sui marker di riferimento. Le osservazioni utili sono sia le componenti di codice che quelle di fase, misurate su più portanti per ciascun ricevitore multicanale.

Tutti i dati GNSS disponibili sono stati opportunamente organizzati a livello informatico, comprendendo anche le osservazioni acquisite dalle 20 stazioni permanenti di inquadramento descritte al paragrafo 3.2. L'elaborazione dell'archivio RINEX è stata effettuata utilizzando

l'approccio indifferenziato PPP - *Precise Point Positioning* implementato nel software GipsyX 1.7 (<https://gipsy.jpl.nasa.gov>), utilizzando solo i dati acquisiti dai satelliti della costellazione GPS. Ad oggi, l'elaborazione dei dati GNSS effettuata seguendo l'approccio PPP permette di ottenere accuratezze e precisioni comparabili a quelle ottenute seguendo un classico approccio basato sulla differenziazione dei segnali di fase (Ayhan, & Almuslmani, 2021, Kouba & Héroux, 2001, Zumberge *et al.*, 1997). Il PPP non richiede il processamento di acquisizioni contemporanee da più ricevitori e rende l'elaborazione dei dati meno onerosa in termini di tempo e di risorse computazionali, rispetto a quelle richieste per elaborare un'intera rete di stazioni permanenti GNSS utilizzando il classico approccio differenziato (Gandolfi *et al.*, 2016).

Attraverso appropriate combinazioni lineari delle osservazioni, è possibile eliminare e/o ridurre fortemente l'effetto di alcuni errori sistematici che perturbano in modo significativo le soluzioni GNSS, permettendo così di raggiungere accuratezze centimetriche nelle posizioni giornaliere.

Attraverso l'approccio indifferenziato, in caso di errori, è possibile riprocessare la singola stazione senza rendere necessaria la rielaborazione dell'intera rete, come accade seguendo l'approccio differenziato (Gandolfi & Poluzzi, 2013). Altri importanti vantaggi legati all'elaborazione dei dati GNSS con l'approccio PPP consistono nell'allineamento diretto delle coordinate entro un sistema di riferimento globale.

Secondo questo approccio, la rete di inquadramento di stazioni di riferimento assume un diverso ruolo rispetto all'approccio differenziato basato sul calcolo di vettori congiungenti le diverse stazioni, infatti in questo caso le stazioni di riferimento vengono impiegate per un processo di riallineamento che avviene nello spazio delle soluzioni, invece che tra le misure. I principali parametri di processo utilizzati sono stati i seguenti:

- Modello troposferico: Vienna Mapping Function (VMF);
- Angolo di cut-off: 10°;
- Calibrazioni assolute delle variazioni dei centri di fase delle antenne utilizzando i modelli contenuti nel file utilizzato in ambito IGS `igs14.atx`;
- Orbite di inquadramento: Orbite fiduciali JPL.

Il risultato dell'elaborazione con GipsyX, sono le serie temporali delle soluzioni allineate al sistema di riferimento globale ITRF2014. Attraverso una analisi statistica delle serie temporali delle posizioni tridimensionali giornaliere è possibile stimare i parametri di velocità di movimento.

3.4 Stima delle velocità relative

Il moto complessivo include il movimento di deriva continentale ma attraverso i parametri di trasformazione, pubblicati nella Technical Note 1 EUREF (Altamimi, 2018), le serie temporali possono essere trasformate nel sistema Europeo ETRF2000, così da rimuovere la componente di spostamento generata dal moto rigido della placca euro-asiatica. In questo modo sono state ottenute le velocità relative nelle tre direzioni (Nord, Est, Up) rispetto ad un sistema di riferimento intra-placca. Pertanto, conclusa l'elaborazione con il software GipsyX, le serie temporali di ogni stazione sono state analizzate come segue:

1. Trasformazione delle soluzioni, espresse in coordinate cartesiane geocentriche (X, Y, Z) intra-placca ETRF2000, nel sistema di riferimento geodetico locale (Nord, Est, Up) secondo il piano tangente all'ellissoide definito in un punto origine per ciascuna stazione, insieme alla propagazione della matrice di varianza e covarianza riferita alle coordinate geodetiche locali;
2. Individuazione di eventuali discontinuità dovute a cambi intercorsi nella strumentazione nel periodo analizzato (ricevitore/antenna), note grazie ai metadata disponibili per ciascuna stazione;
3. Le serie temporali così ottenute sono state trattate con un tool specifico sviluppato in ambiente Matlab denominato Tsview e descritto in (Herring, 2003), mediante il quale sono stati realizzati il filtraggio degli outlier con soglia 3σ . Si è proceduto alla correzione delle

discontinuità e alla stima delle componenti periodiche con frequenza annuale e semi-annuale. È stato così generato l'output grafico delle serie temporali dei residui ottenuti rispetto alle serie detrended, per le tre componenti Nord, Est e Up.

Nella Tabella 3.3, per ciascuna stazione ricadente nell'area oggetto d'indagine, vengono riportate le velocità orizzontali Nord, Est e quella verticale Up con gli scarti quadratici medi associati, espresse nel sistema di riferimento intra-placca ETRF2000, sia per le 21 stazioni utilizzate per la calibrazione dei dati interferometrici, sia per le 7 stazioni utilizzate per la verifica a posteriori dei dati.

Tabella 3.3: Velocità orizzontali e verticali stimate nel sistema di riferimento intra-placca ETRF2000 e scarti quadratici medi associati (σV) in mm/anno.

ID	Stazione	V_N (mm/anno)	σV_N (mm/anno)	V_E (mm/anno)	σV_E (mm/anno)	V_U (mm/anno)	σV_U (mm/anno)
STAZIONI CALIBRAZIONE							
1	BGDR	2,10	0,04	0,24	0,03	0,98	0,15
2	BLGN	5,68	0,02	-0,81	0,02	-8,25	0,05
3	BOBB	1,09	0,01	0,31	0,01	-0,54	0,04
4	BRAS	1,65	0,02	0,09	0,01	0,48	0,04
5	BRIS	3,41	0,02	1,09	0,01	0,63	0,05
6	CAST	1,76	0,02	-0,01	0,01	0,77	0,05
7	CODI	2,19	0,01	0,01	0,01	-2,81	0,03
8	FERR	2,56	0,01	0,39	0,01	-1,12	0,03
9	GARI	1,29	0,01	-0,28	0,01	-2,75	0,04
10	GUAS	1,81	0,01	0,10	0,01	-1,65	0,05
11	ITIM	3,46	0,01	0,82	0,01	-0,37	0,03
12	MODE	2,83	0,01	0,82	0,01	-4,10	0,04
13	MSEL	2,81	0,01	0,92	0,01	-1,83	0,03
14	MTRZ	3,83	0,02	1,57	0,02	-0,85	0,08
15	PARM	1,86	0,01	0,75	0,01	-0,30	0,05
16	PIAC	1,41	0,01	0,16	0,01	-0,71	0,03
17	RAVE	2,94	0,01	0,31	0,01	-3,75	0,04
18	REGG	2,35	0,01	-0,23	0,01	-3,12	0,04
19	SGIP	3,11	0,01	1,49	0,02	-6,97	0,04
20	TARO	1,12	0,01	0,29	0,01	-0,58	0,05
21	VERG	2,53	0,01	1,86	0,01	1,00	0,05
STAZIONI PER VERIFICA A POSTERIORI							
1	BOL1	4,70	0,02	0,37	0,01	-0,32	0,04
2	BOLG	4,14	0,02	0,32	0,02	-2,04	0,06
3	COLL	1,59	0,02	1,25	0,02	-2,33	0,05
4	FIUN	2,39	0,01	3,27	0,02	-8,71	0,04
5	ITRN	3,94	0,01	0,95	0,03	-1,23	0,04
6	MOPS	3,17	0,01	0,73	0,02	-3,92	0,04
7	SMAR	2,70	0,02	-0,60	0,02	-3,72	0,06

4. Calibrazione dell'analisi interferometrica, validazione dei dati e cartografia dei movimenti verticali del suolo

L'attività di seguito descritta è costituita dal complesso di operazioni finalizzate alla calibrazione e alle verifiche alle quali sono stati sottoposti i risultati dell'analisi interferometrica, secondo un nuovo approccio rispetto a quello utilizzato nella precedente campagna di rilievo relativa al periodo 2011-2016. I dati utilizzati nell'ambito del lavoro sono stati:

- i risultati dell'analisi delle serie temporali delle stazioni permanenti GNSS, elaborati con l'approccio Precise Point Positioning;
- i risultati dell'analisi interferometrica SqueeSAR™;
- i dati cartografici di base e database di immagini satellitari ad alta risoluzione.

I principali aspetti trattati sono stati:

- definizione di un *datum* di velocità per l'asservimento all'analisi interferometrica e verifica a posteriori dell'efficacia del suo utilizzo nella fase di calibrazione del dato interferometrico;
- analisi statistiche sulla distribuzione spaziale e sulla tipologia dei punti di misura, impiego di procedure di screening e validazione del dataset complessivo per l'individuazione e la rimozione di eventuali outliers;
- interpolazione delle velocità desunte dall'analisi interferometrica al fine di produrre sia un modello raster delle velocità di movimento verticale del suolo per l'area di pianura dell'Emilia-Romagna, sia la cartografia a curve isocinetiche.

4.1 Calibrazione dell'analisi interferometrica SqueeSAR™

La calibrazione applicata ai dati SqueeSAR™, a seguito della scomposizione del moto nella componente verticale e orizzontale (est-ovest) (vedi paragrafo 2.6), è stata realizzata tramite l'utilizzo di stazioni permanenti GNSS i cui dati sono stati confrontati con quelli di bersagli radar individuati nell'intorno di 100 metri dalla stazione, consentendo di definire una corrispondenza spaziale utile a calcolare una stima della differenza tra le due misure. Il metodo di calibrazione ha previsto più fasi, a partire dall'acquisizione indipendente dei dati SqueeSAR™ di origine e quelli della rete GNSS.

I dati GNSS ottenuti sono stati filtrati usando una finestra mobile di 21 giorni (10 giorni prima e 10 giorni dopo ogni data) per ridurre il rumore sulle misure, mentre i cinque bersagli a più alta qualità radar in un intorno di 100 metri dalle stazioni GNSS sono stati selezionati e usati per il calcolo delle serie storiche medie (ATS) da utilizzare nel confronto con i dati GNSS.

Le velocità medie verticali e est-ovest dei bersagli radar selezionati sono state sottratte alle velocità medie GNSS e dalle differenze ottenute è stata stimata e rimossa da TRE ALTAMIRA dai dati SqueeSAR™ una componente di velocità a bassa frequenza (un piano), generalmente dovuta a disturbi atmosferici non compensati o parametri orbitali non accurati.

Le Tabelle 4.1 e 4.2 riportano una sintesi dei valori di riferimento pre-calibrazione rispettivamente per la componente verticale ed est-ovest. Nel dettaglio:

- la velocità media dei dati GNSS filtrati (*GNSS vel*);
- la velocità media dei bersagli radar selezionati nell'intorno della stazione (*SqueeSAR vel*);
- il numero di bersagli radar selezionati per il calcolo della velocità media di riferimento (*SqueeSAR n° MP*);
- la relativa deviazione standard delle velocità medie dei bersagli radar selezionati (*SqueeSAR vel σ*);
- le differenze utilizzate per la stima e rimozione del piano (*Differenza pre-calibrazione*).

Tabella 4.1: Componente verticale; valori di riferimento utilizzati per la calibrazione (mm/anno).

ID	Stazione	GNSS vel vert	SqueeSAR vel	SqueeSAR vel σ	SqueeSAR n° MP	Differenza pre- calibrazione
1	BGDR	0,9	-		0	
2	BLGN	-8,3	-5,5	0,3	5	2,8
3	BOBB	-0,6	1,1	0,5	5	1,7
4	BRAS	0,5	0,4	0,0	1	0,0
5	BRIS	0,6	-		0	
6	CAST	0,8	0,7	0,2	5	-0,1
7	CODI	-2,8	-0,1	0,4	5	2,7
8	FERR	-1,0	0,2	0,3	5	1,3
9	GARI	-2,8	0,0	0,4	5	2,8
10	GUAS	-1,6	0,3	0,3	5	2,0
11	ITIM	-0,4	0,7	0,2	5	1,1
12	MODE	-4,4	-0,7	0,2	5	3,8
13	MSEL	-1,9	1,9	0,5	2	3,8
14	MTRZ	0,0	-		0	
15	PARM	-0,1	0,9	0,8	5	1,0
16	PIAC	-0,7	0,2	0,2	5	0,9
17	RAVE	-3,8	-0,6	0,4	5	3,2
18	REGG	-3,2	-0,1	0,2	5	3,1
19	SGIP	-7,0	-3,5	0,9	5	3,5
20	TARO	-0,6	0,2	0,1	5	0,8
21	VERG	0,7	1,0	0,1	5	0,2

Tabella 4.2: Componente est-ovest; valori di riferimento utilizzati per la calibrazione (mm/anno).

ID	Stazione	GNSS vel oriz	SqueeSAR vel	SqueeSAR vel σ	SqueeSAR n° MP	Differenza pre- calibrazione
1	BGDR	0,2			0	
2	BLGN	-0,9	-1,8	0,3	5	-0,9
3	BOBB	0,3	0,2	0,2	5	-0,2
4	BRAS	0,0	-0,1	0,0	1	-0,2
5	BRIS	1,1			0	
6	CAST	0,0	-0,5	0,6	5	-0,5
7	CODI	0,0	-0,3	0,6	5	-0,3
8	FERR	0,4	0,0	0,2	5	-0,3
9	GARI	-0,3	-0,3	0,3	5	0,0
10	GUAS	0,1	-0,1	0,1	5	-0,3
11	ITIM	0,8	-0,2	0,2	5	-1,0
12	MODE	0,8	-0,1	0,1	5	-0,9
13	MSEL	0,9	0,6	0,0	2	-0,3
14	MTRZ	1,5			0	
15	PARM	0,8	0,2	0,4	5	-0,6
16	PIAC	0,1	-0,1	0,1	5	-0,3
17	RAVE	0,3	0,0	0,6	5	-0,3
18	REGG	-0,2	0,3	0,2	5	0,5
19	SGIP	1,5	1,4	1,1	5	-0,1
20	TARO	0,2	0,1	0,2	5	-0,1
21	VERG	1,8	0,5	0,2	5	-1,3

Le serie storiche medie dei bersagli radar selezionati (ATS) sono state dunque confrontate con le serie storiche delle stazioni GNSS corrispondenti, e ciò è stato possibile farlo per 18 delle 21 stazioni GNSS. Dalle differenze ottenute è stata generata una serie storica media delle differenze (serie storica media dei residui) che è stata rimossa dalle serie storiche di tutti i punti SqueeSARTM (Figure 4.1 e 4.2). Tale serie storica rappresenta il movimento del punto di riferimento SqueeSARTM locale rispetto alla rete assoluta GNSS. Il risultato consiste quindi nei dati SqueeSARTM calibrati, vincolati allo stesso sistema di riferimento della rete GNSS.

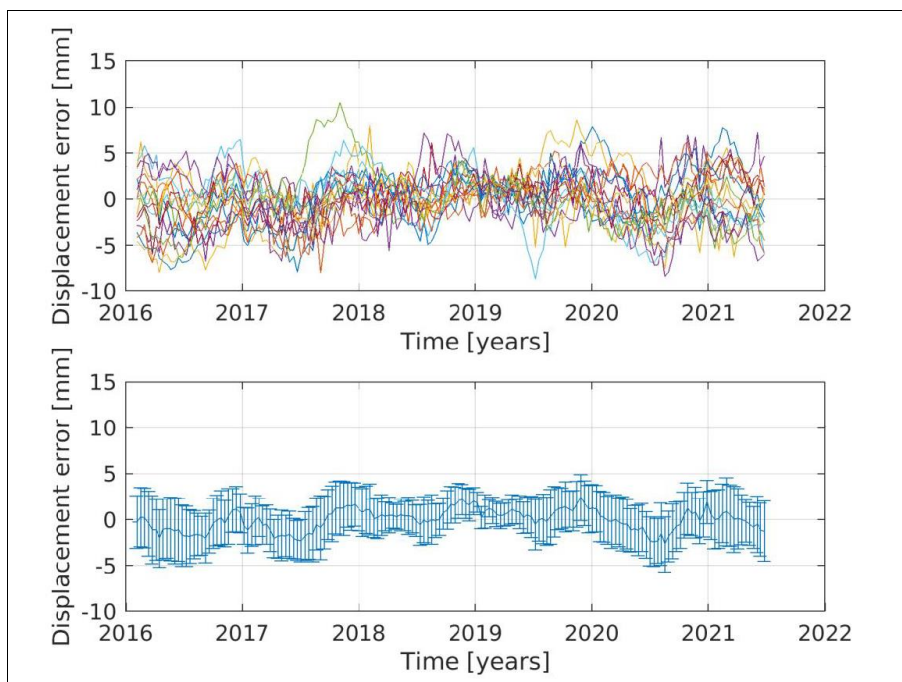


Figura 4.1: Componente verticale. Serie storiche dei residui per tutte le stazioni GNSS utilizzate (in alto) e serie storica media dei residui (in basso) utilizzata per la calibrazione.

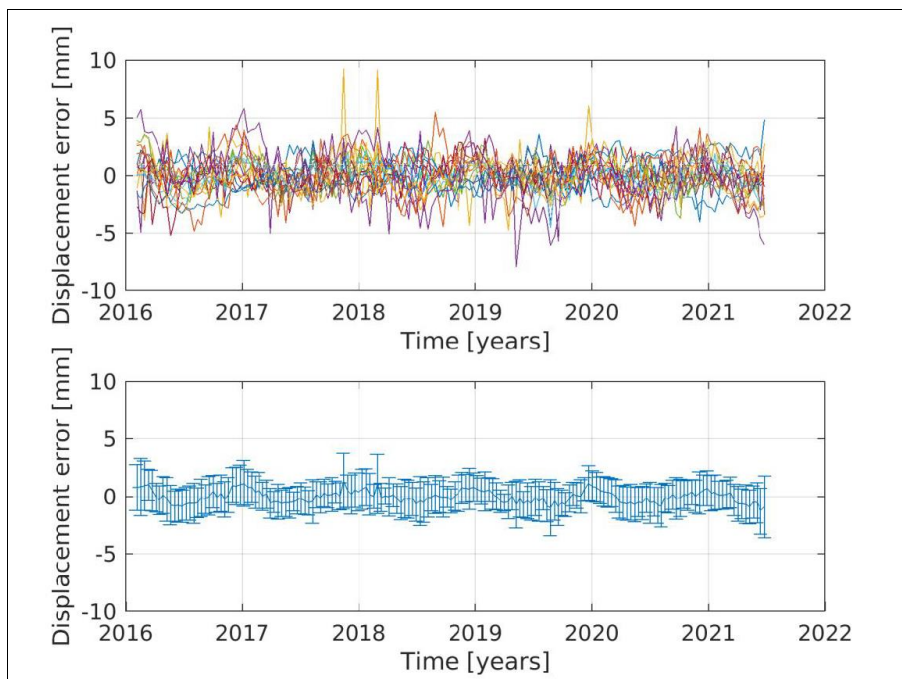


Figura 4.2: Componente est-ovest. Serie storiche dei residui per tutte le stazioni GNSS utilizzate (in alto) e serie storica media dei residui (in basso) utilizzata per la calibrazione.

I risultati ottenuti, riportati nelle Tabelle 4.3 e 4.4, mostrano l'ottima calibrazione ottenuta. I residui hanno valore medio minore di 1 mm/anno per le velocità verticali e orizzontali desunte dal confronto tra velocità InSAR e GNSS sotto campionato, in linea con la precisione di misura ottenibile con entrambe le tecniche di monitoraggio utilizzate.

In Figura 4.3 sono riportati i confronti tra le serie storiche dei dati GNSS e le serie storiche dei dati SqueeSARTM riferite alla componente verticale e orizzontale (est-ovest) di spostamento dopo la calibrazione (vedi Tabelle 4.3 e 4.4).

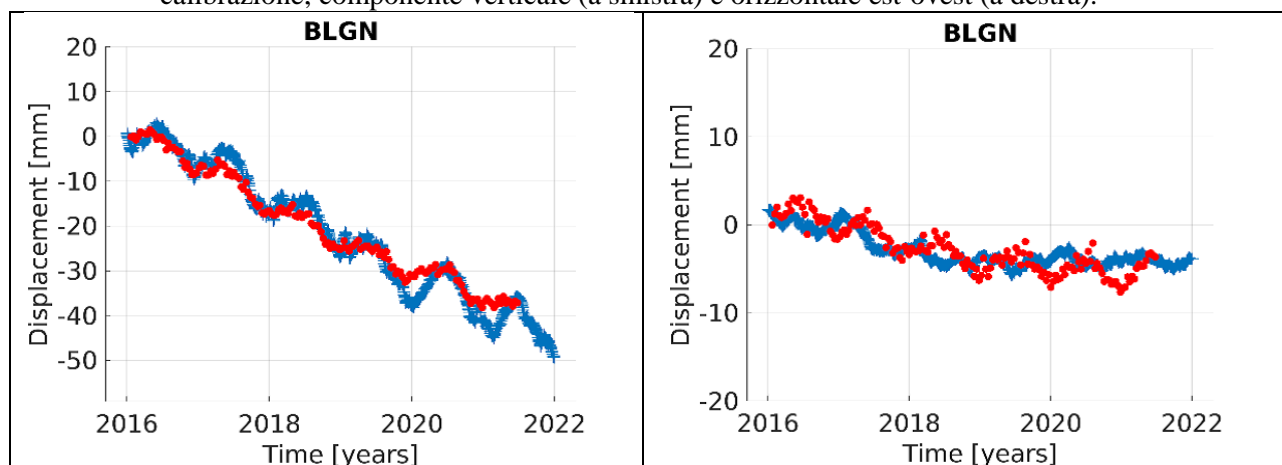
Tabella 4.3: Componente verticale. Valori delle velocità SqueeSARTM post-calibrazione e relativi residui (mm/anno).

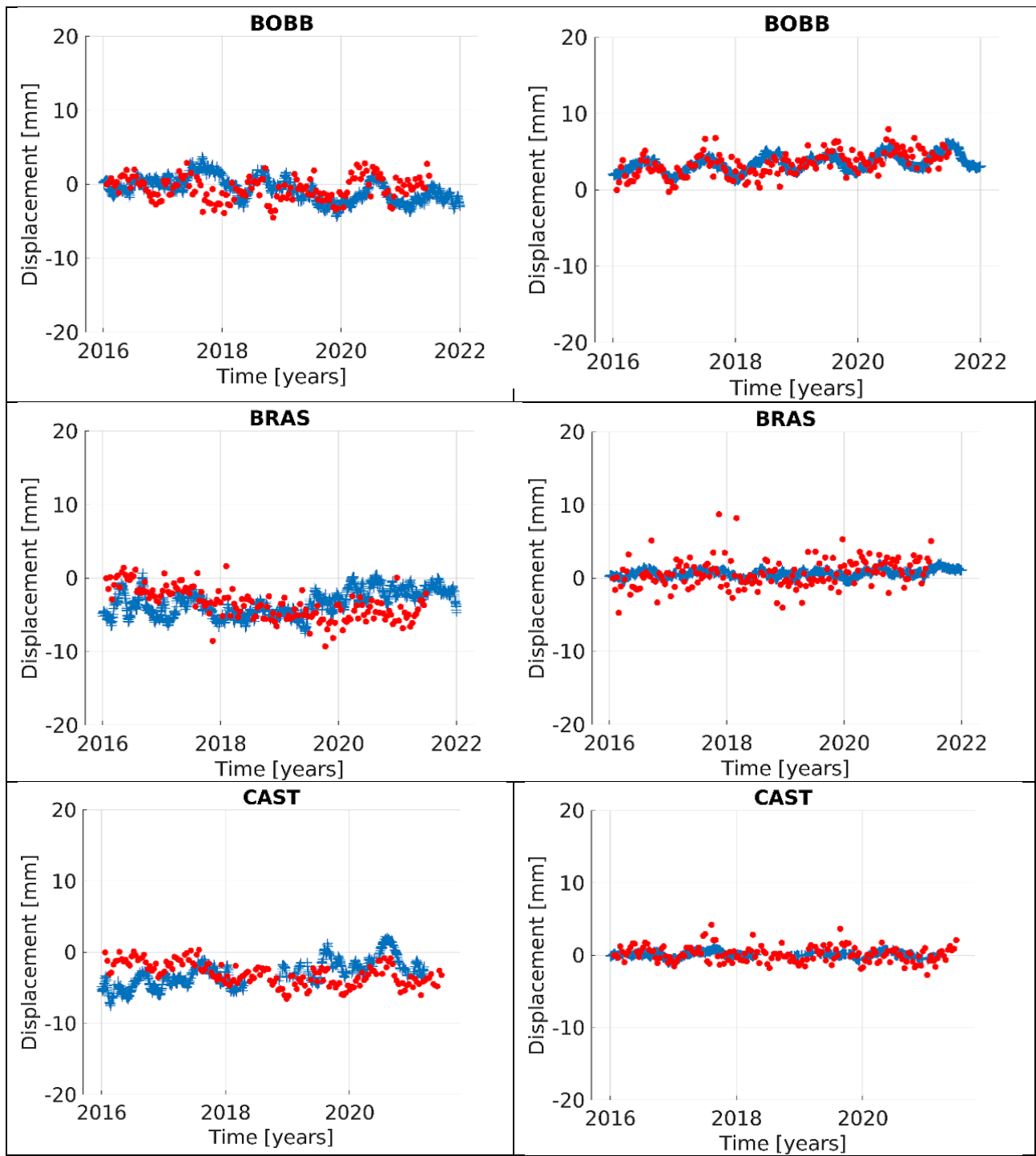
ID	Stazione	GNSS vel vert	SqueeSAR vel post-calibrazione	Residui post-calibrazione Vel
1	BGDR	0,9		
2	BLGN	-8,3	-7,5	1,0
3	BOBB	-0,6	0,0	0,6
4	BRAS	0,5	-0,9	-1,4
5	BRIS	0,6		
6	CAST	0,8	-0,6	-1,4
7	CODI	-2,8	-3,1	-0,3
8	FERR	-1,0	-2,4	-1,4
9	GARI	-2,8	-2,9	-0,1
10	GUAS	-1,6	-1,8	-0,2
11	ITIM	-0,4	-1,3	-1,0
12	MODE	-4,4	-2,6	1,8
13	MSEL	-1,9	-0,3	1,6
14	MTRZ	0,0		
15	PARM	-0,1	-0,8	-0,7
16	PIAC	-0,7	-1,5	-0,8
17	RAVE	-3,8	-3,1	0,7
18	REGG	-3,2	-1,9	1,2
19	SGIP	-7,0	-5,6	1,4
20	TARO	-0,6	-0,7	-0,1
21	VERG	0,7	-0,6	-1,3
Media complessiva residui (mm/anno)				-0,02

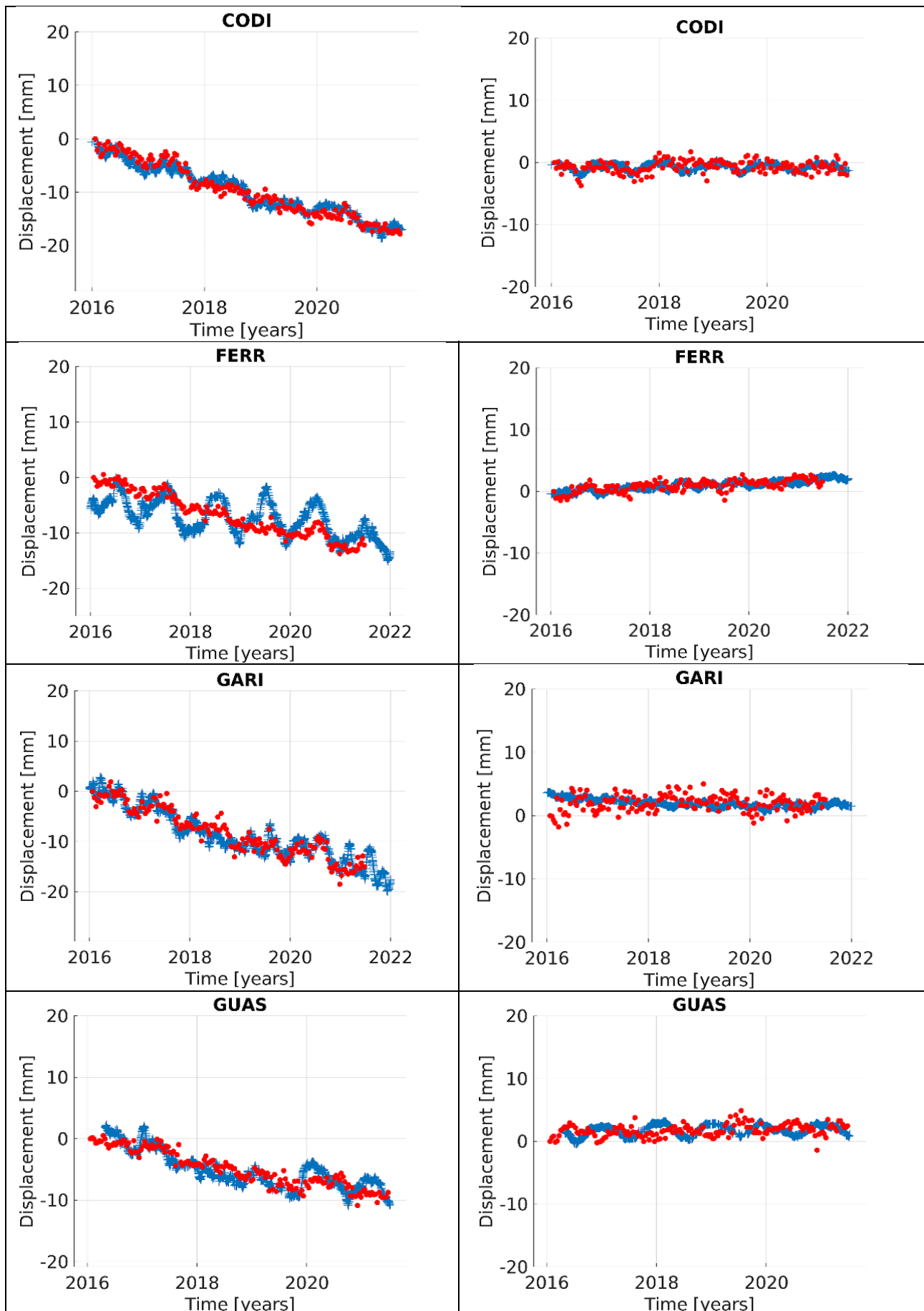
Tabella 4.4: Componente est-ovest. Valori delle velocità SqueeSAR™ post-calibrazione e relativi residui (mm/anno).

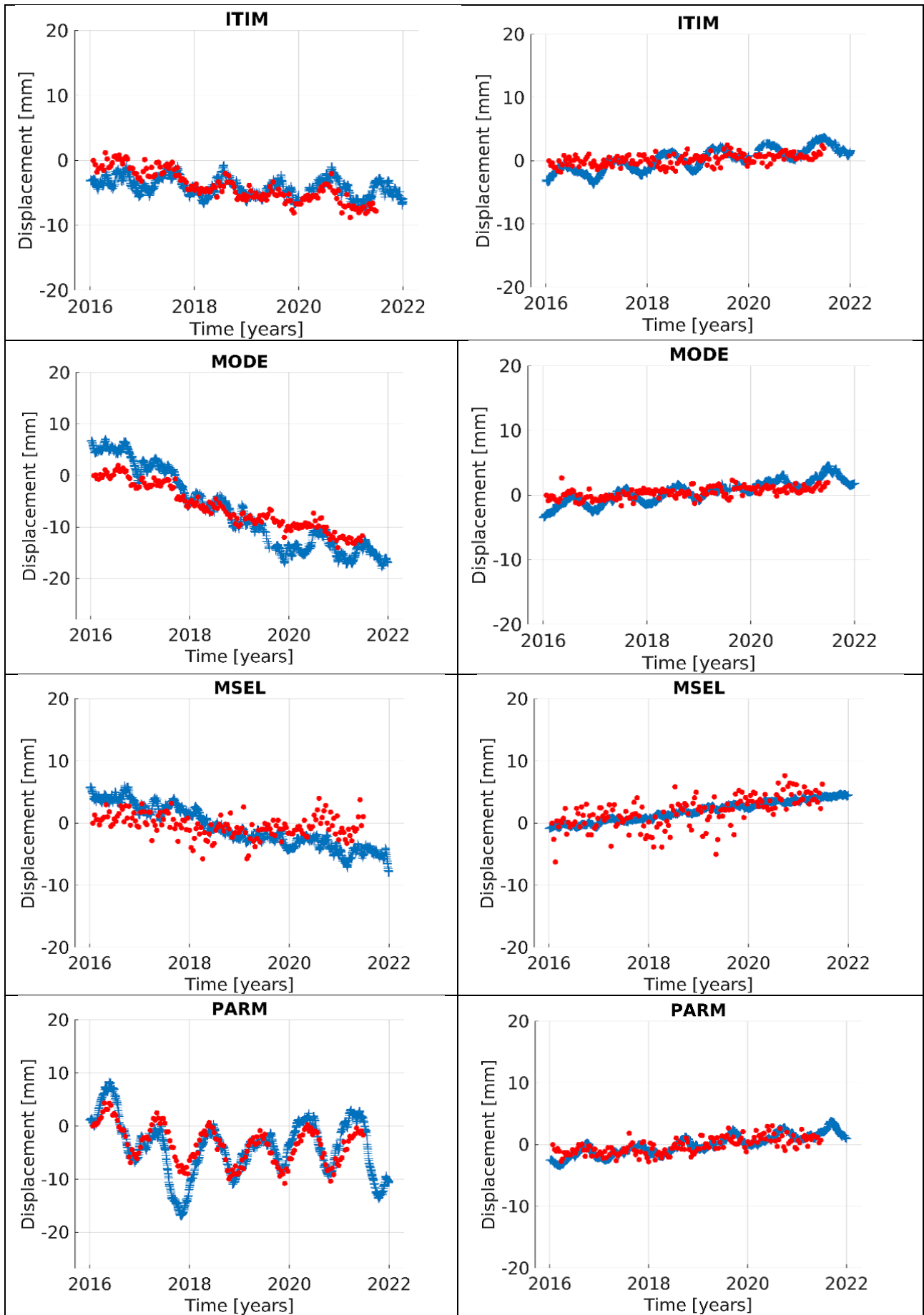
ID	Stazione	GPS vel orizz.	SqueeSAR vel post-calibrazione	Residui post-calibrazione Vel
1	BGDR	0,2		
2	BLGN	-0,9	-1,4	-0,5
3	BOBB	0,3	0,5	0,2
4	BRAS	0,0	0,3	0,3
5	BRIS	1,1		
6	CAST	0,0	-0,1	-0,1
7	CODI	0,0	0,1	0,1
8	FERR	0,4	0,4	0,0
9	GARI	-0,3	0,1	0,4
10	GUAS	0,1	0,2	0,1
11	ITIM	0,8	0,3	-0,5
12	MODE	0,8	0,3	-0,5
13	MSEL	0,9	1,0	0,1
14	MTRZ	1,5		
15	PARM	0,8	0,5	-0,2
16	PIAC	0,1	0,2	0,0
17	RAVE	0,3	0,4	0,1
18	REGG	-0,2	0,7	0,9
19	SGIP	1,5	1,8	0,3
20	TARO	0,2	0,5	0,3
21	VERG	1,8	1,0	-0,8
Media complessiva residui (mm/anno)				0,01

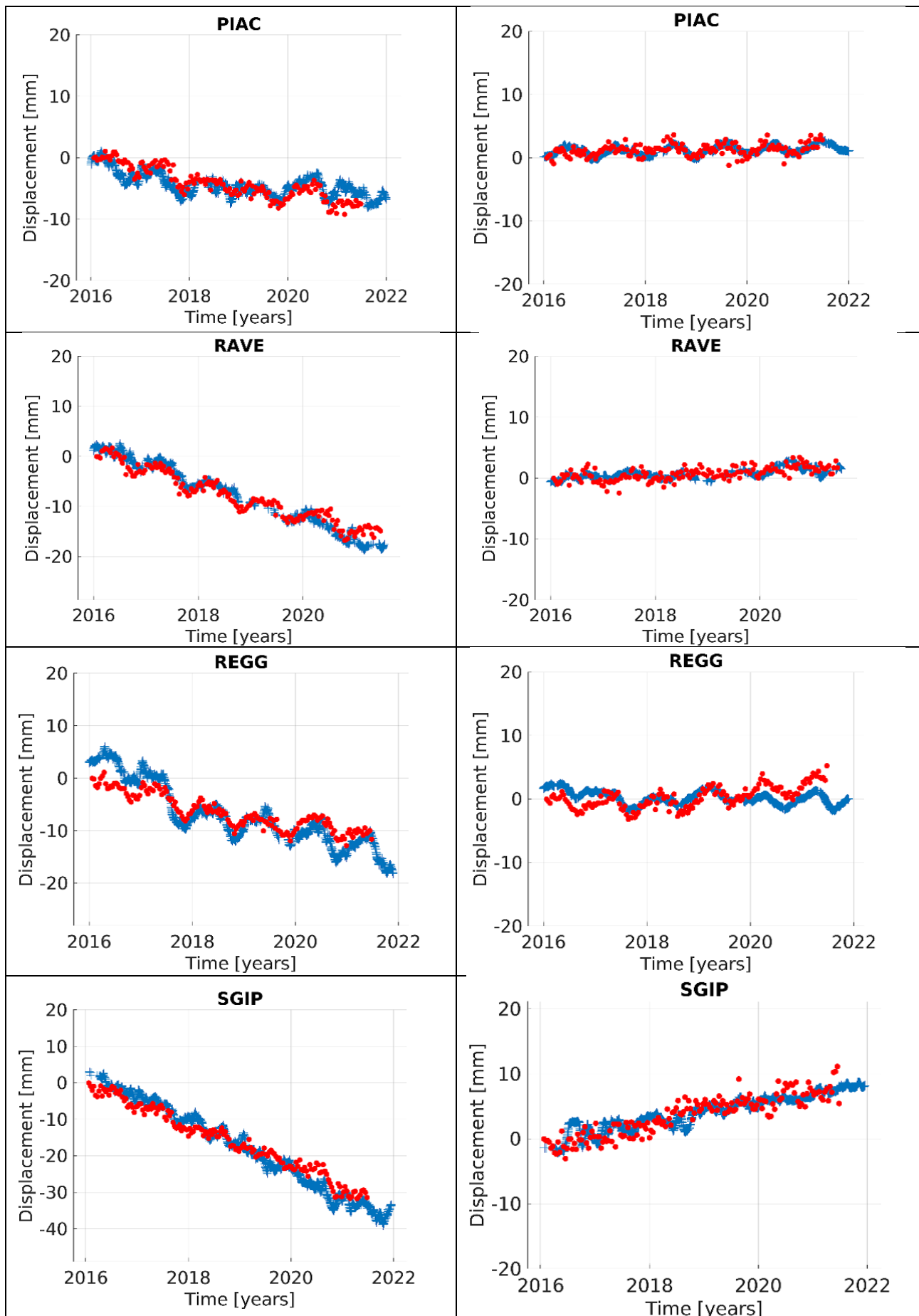
Figura 4.3: Confronto delle serie storiche SqueeSAR™ (in rosso) con le serie storiche GNSS (in blu) dopo la calibrazione; componente verticale (a sinistra) e orizzontale est-ovest (a destra).

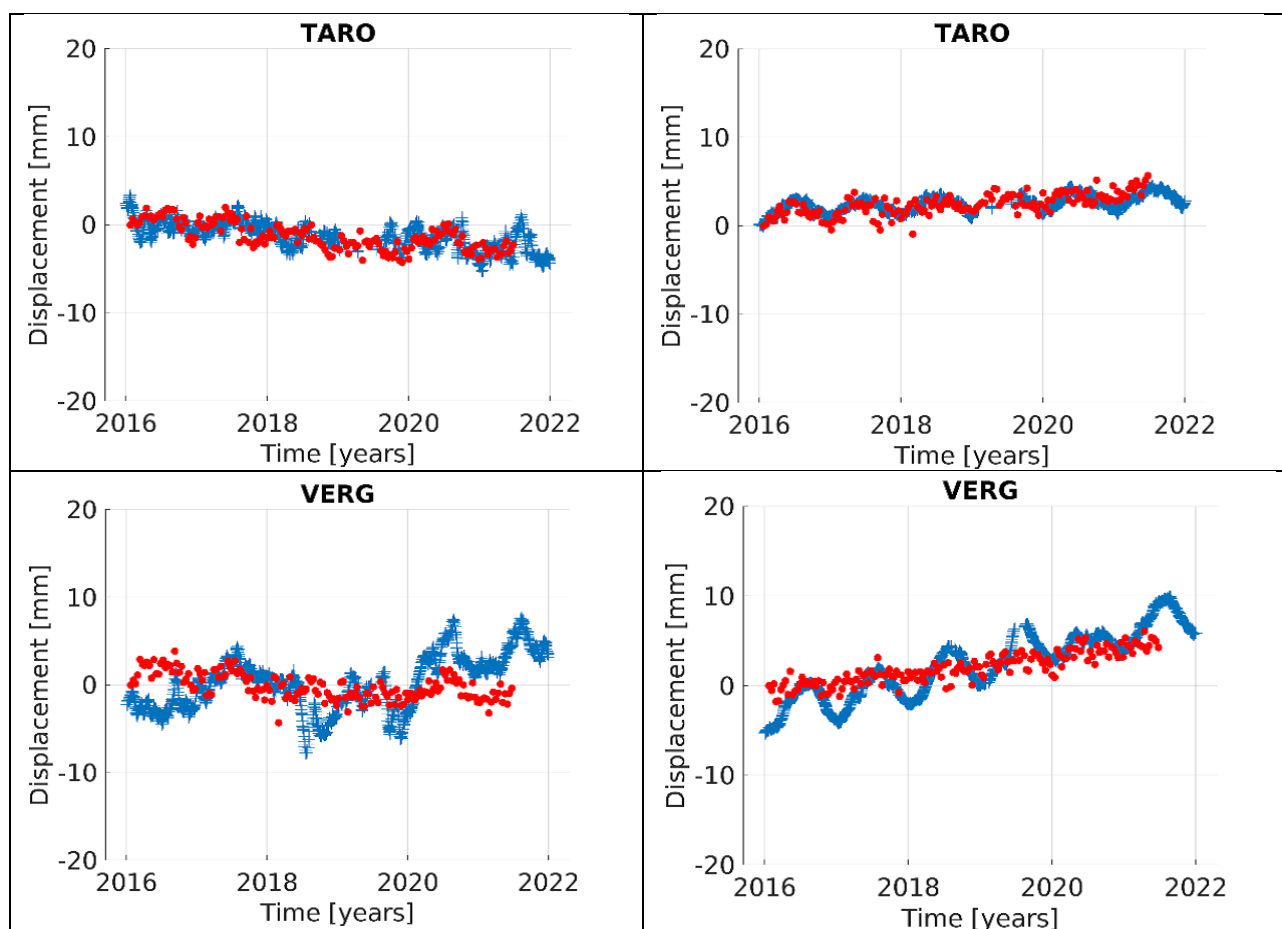












4.2 Verifiche dei risultati della calibrazione

La verifica dei risultati della calibrazione, oltre le 21 stazioni GNSS, è avvenuta considerando anche i valori della velocità di movimento verticale di ulteriori 7 stazioni GNSS, aventi la funzione di *check points* per un controllo cieco rispetto al risultato della calibrazione (vedi Tabelle 3.2 e 3.3). La verifica è stata effettuata considerando le velocità InSAR ricalcolate sul periodo di misura GNSS. Il dato è illustrato in Tabella 4.5 nella quale, per ogni stazione è riportata la velocità di movimento dedotta con GNSS, la velocità derivata dall'analisi dei dati SqueeSAR™, fissando un raggio di cattura degli pseudo-MP, attorno alla stazione GNSS, rispettivamente pari a 100 m e 250 m. Per ogni raggio di cattura, le velocità degli pseudo-MP posti ad una distanza minore od uguale a quella scelta sono state mediate, ed è stato effettuato il confronto con la velocità della stazione GNSS, valutando l'entità dei residui (alla velocità della stazione GNSS nel periodo è stata sottratta la velocità in componente verticale dei bersagli radar calibrati. Sono stati scelti due differenti raggi di cattura così da poter individuare, per ogni stazione GNSS, almeno un punto pseudo-MP.

Tabella 4.5: Risultati del confronto tra le velocità di movimento verticale (mm/anno) determinate con analisi interferometrica e con misure GNSS per le 7 stazioni permanenti GNSS considerate come check points in funzione della distanza – Raggio di cattura.

Stazione	Latitudine	Longitudine	Vel. GNSS	Raggio di cattura = 100m			Raggio di cattura = 250m		
				N MP	Vel. SAR	Residui	N MP	Vel. SAR	Residui
BOL1	44,487619	11,328837	-0,3	11	-1,8	1,5	56	-1,8	1,5
BOLG	44,500216	11,356774	-2,0	13	-2,8	0,8	69	-3,1	1,1
COLL	44,752811	10,215974	-2,3	10	-1,1	-1,2	68	-1,2	-1,1
FIUN	44,397266	12,315946	-8,7	2	-6,7	-2,0	8	-7,7	-1,0

ITRN	44,048319	12,582069	-1,2	11	-2,1	0,9	75	-2,1	0,9
MOPS	44,629351	10,949190	-3,9	12	-2,7	-1,2	55	-2,2	-1,7
SMAR	44,594425	12,247078	-3,7	8	-3,7	0,0	21	-3,9	0,2
Media complessiva residui (mm/anno)				-	-	-0,17	-	-	-0,01

Il residuo medio sui 7 punti di controllo cieco è risultato pari a:

- $-0,17$ mm/anno, con deviazione standard di $1,31$ mm/anno, per il raggio di cattura di 100 m;
- $0,01$ mm/anno, con deviazione standard di $1,25$ mm/anno, per il raggio di cattura di 250 m.

La differenza di velocità media complessiva tra i diversi raggi di cattura è in gran parte determinata dalla stazione FIUN, dove sono presenti solo due pseudo-MP entro i 100 m di distanza dalla stazione, aventi un valore caratteristico di velocità di subsidenza (velocità media pari a $-6,7$ mm/anno), che è minore rispetto a quello degli pseudo-MP individuati ad una distanza compresa tra i 100 e 250 m dalla stazione stessa (velocità media pari a $-7,7$ mm/anno), come mostrato in Figura 4.4.

Il campione esaminato, seppur ristretto, consiste complessivamente in 21 stazioni permanenti GNSS distribuite sul territorio di analisi, oltre le 7 stazioni di *check points* utilizzate per un controllo cieco dei risultati a seguito della calibrazione. I valori ottenuti possono essere considerati del tutto soddisfacenti in una procedura di validazione della metodologia. Pertanto, volendo attribuire una soglia d'incertezza complessiva dell'intera analisi di velocità di spostamento effettuata, si ritiene che possa essere considerato il valore di circa ± 2 mm/anno, già evidenziato anche nella precedente analisi 2011-2016. Per tale motivo, come più avanti descritto, si è scelto di tracciare le curve isocinetiche nella cartografia finale con passo di $2,5$ mm/anno.

Secondo questi criteri, il *dataset* prodotto dall'analisi interferometrica può dunque ritenersi di precisione analoga a quella della precedente analisi condotta nel periodo 2011-2016.

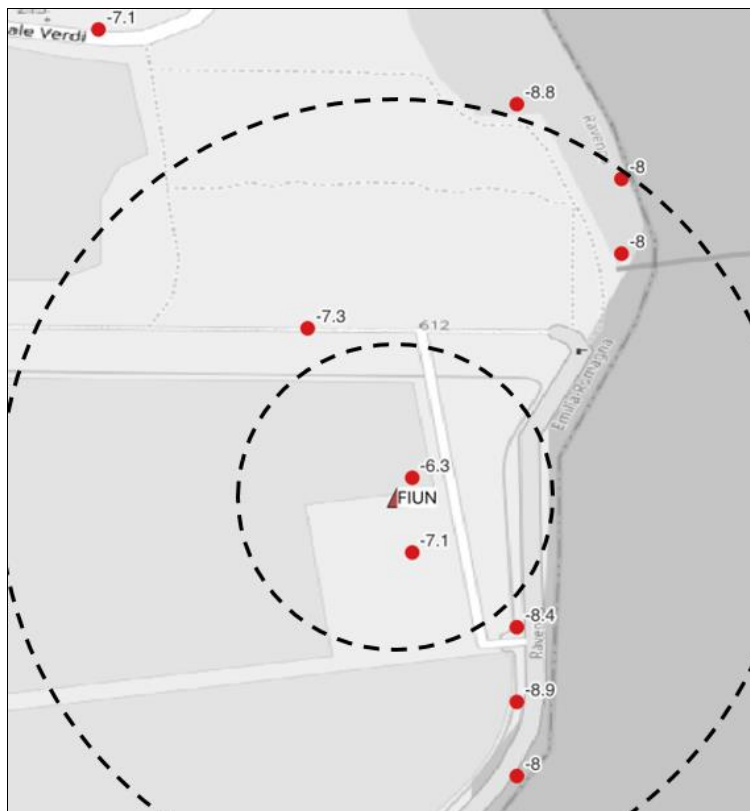


Figura 4.4: Rappresentazione della distribuzione degli pseudo PS attorno alla stazione GPS FIUN, con le relative velocità di subsidenza e le distanze di raggio 100 e 250 m.

4.3 Restituzione finale del dataset interferometrico calibrato 2016-2021

A seguito delle attività di calibrazione delle velocità medie annue verticale e orizzontale est-ovest del suolo, per ciascuno dei 704.444 pseudo-MP derivanti dall'analisi interferometrica effettuata nel periodo 2016-2021 (vedi paragrafo 2.4), è stata restituita la serie storica calibrata sia delle velocità verticali sia di quelle orizzontali est-ovest, in apposito database georeferenziato. Una rappresentazione per punti, nella quale si associa ad ogni pseudo-MP un colore in funzione della velocità di movimento (Figure 4.5 e 4.6), permette di visualizzare la distribuzione delle velocità nelle diverse zone del territorio dell'Emilia-Romagna. Le scale di colori utilizzate nelle rappresentazioni sono le medesime delle corrispondenti elaborazioni pre-calibrazione (vedi Figure 2.17 e 2.18).

La carta delle velocità medie orizzontali est-ovest è una delle novità dell'aggiornamento della cartografia di subsidenza e permette di evidenziare, in particolare negli areali di pianura dove sono presenti movimenti verticali significativi, l'esistenza di movimenti orizzontali associati con direzione est nel bolognese, nel reggiano e nella zona costiera (foce dei Fiumi Uniti e Lido di Dante), mentre con direzione ovest nel reggiano e nel bolognese. I movimenti orizzontali nella zona collinare e montana hanno una maggiore variabilità ed intensità rispetto a quelli di pianura, per effetto dei processi gravitativi tettonici presenti.

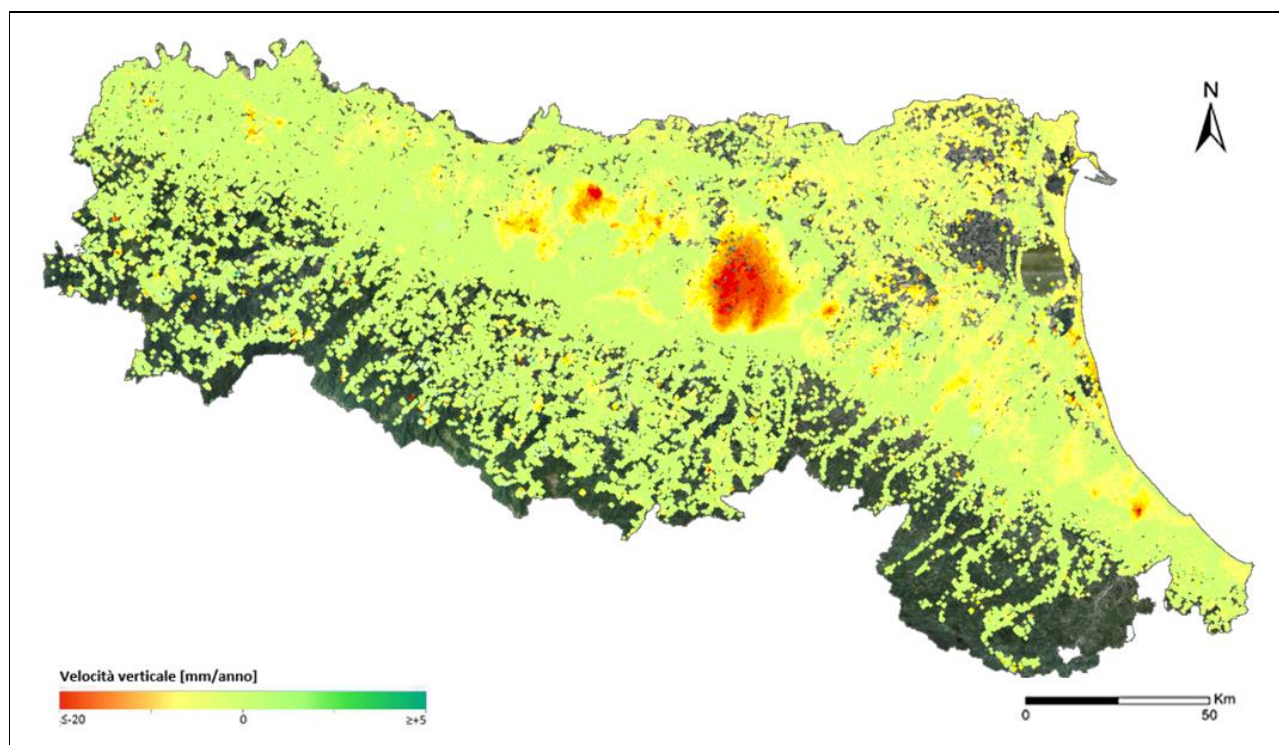


Figura 4.5: Velocità media annua di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 ottenuta dopo la calibrazione con stazioni permanenti GNSS.

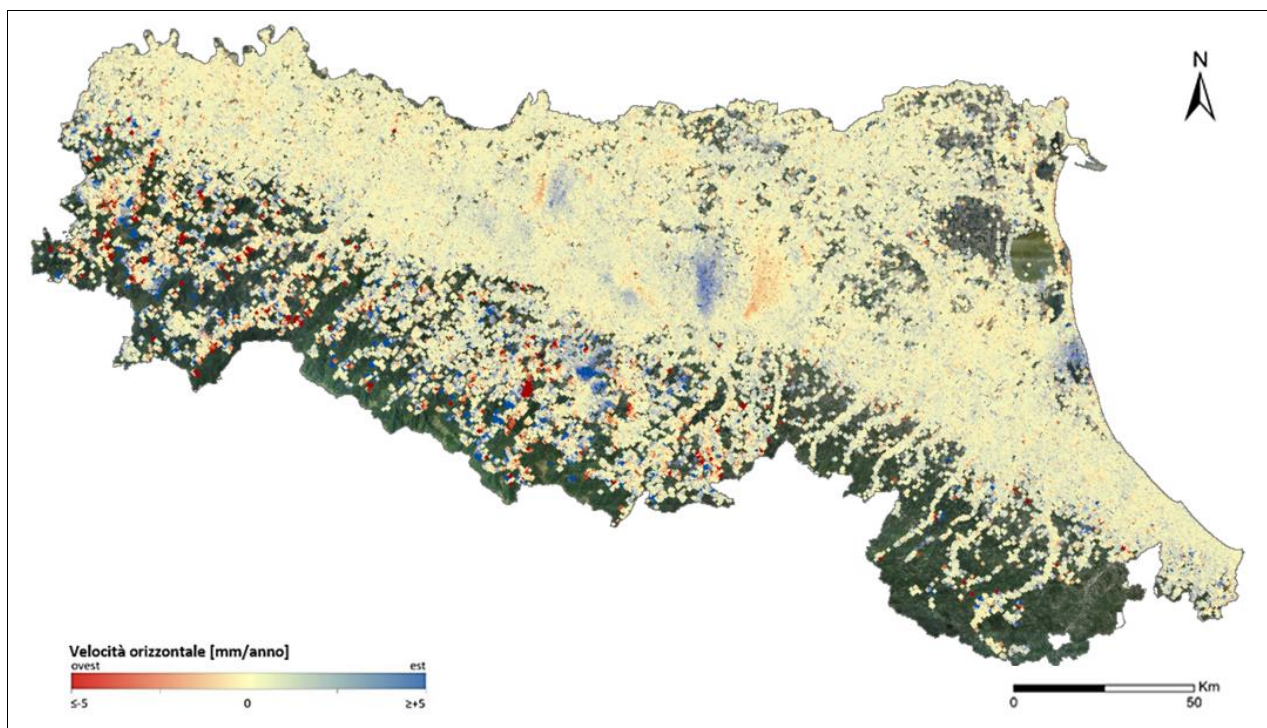


Figura 4.6: Velocità media annua di movimento orizzontale Est-Ovest del suolo nel periodo 2016-2021 ottenuta dopo la calibrazione con stazioni permanenti GNSS.

4.4 Verifica e validazione delle velocità verticali del suolo

Obiettivo di questa fase di lavoro, preliminare alla generazione della nuova cartografia dei movimenti verticali del suolo, è stata la ricerca dei cosiddetti *outliers* nel database dei punti pseudo-MP calibrati derivanti dall'analisi SqueeSARTM, ovvero i dati da considerarsi anomali in quanto riconducibili agli effetti di attività antropiche locali o da cedimenti strutturali delle infrastrutture. Il comportamento “anomalo” di un punto di misura viene qui inteso come una correlazione spaziale nulla o pressoché nulla rispetto ai punti di misura nell'intorno geografico, con un valore che palesemente non è associabile al fenomeno che viene studiato a scala regionale, ma è imputabile alla situazione fisica dei singoli bersagli radar che si riflettono poi sulla valutazione del punto di misura pseudo-MP (es. deformazione termica, cedimenti strutturali), a problemi legati al metodo interferometrico, oppure riconducibile ad attività antropiche di gestione del territorio e urbanizzazione. La verifica e validazione dei punti di misura è un processo importante e al tempo stesso delicato, che deve essere condotto con metodi oggettivi prevalentemente di tipo statistico, vista l'entità dei dati da trattare, ma che deve essere anche accompagnato e suffragato da valutazioni specifiche supportate da un'analisi visiva dell'operatore.

Sono state pertanto svolte due tipologie di verifiche successive:

1. Selezione iniziale degli outliers individuati tra gli estremi (minimi e massimi) della distribuzione di frequenza delle velocità verticali medie del periodo per confronto con attività antropiche note sul territorio o evidenziate singolarmente a scala locale;
2. Selezione ulteriore automatizzata e statistica degli outliers.

Con la prima modalità sono stati individuati ed eliminati 145 MP, ubicati prevalentemente nella zona di pianura, risultando punti “anomali” con velocità verticali < -20 mm/anno e > 5 mm/anno, valutati in base all'uso del suolo e al contesto territoriale, anche attraverso l'incrocio di dati territoriali disponibili presso Arpa e con verifiche visive su immagini satellitari, con l'obiettivo di escluderli dalla rappresentazione dei movimenti a scala regionale, ad esempio quelli determinati da edifici di nuova costruzione, intere nuove urbanizzazioni, presenza di cave, discariche, infrastrutture viarie, eccetera. In Figura 4.5 si riporta l'ubicazione dei punti individuati come outlier, e in Figura 4.6 sono

riportati alcuni esempi a scala locale in cui sono evidenti le velocità di spostamento anomale rispetto i valori circostanti dovute alle attività antropiche o alle infrastrutture, come ad esempio strade o cavalcavia, impianti fotovoltaici a terra di recente installazione, discariche e cave.

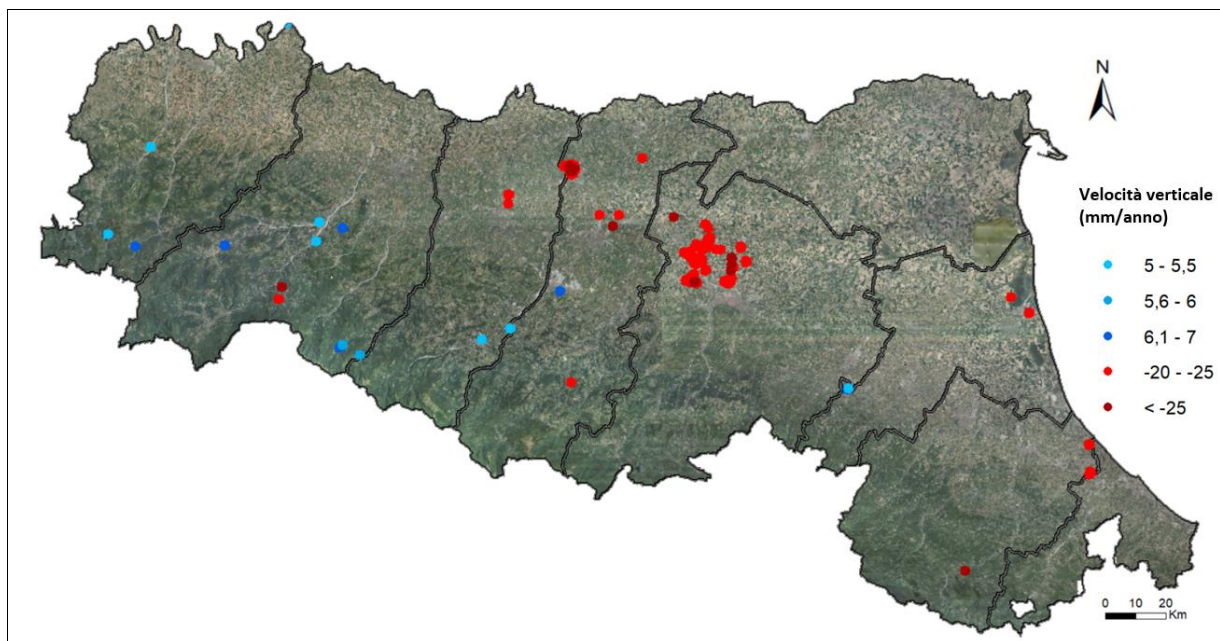


Figura 4.5: Ubicazione degli outliers individuati inizialmente tra gli estremi (minimi e massimi) della distribuzione di frequenza delle velocità verticali medie del periodo per confronto con attività antropiche note sul territorio o evidenziate singolarmente a scala locale.





Figura 4.6: Esempi di zone con velocità verticale del suolo anomale dovute ad attività antropiche o infrastrutture riconosciute come outliers.

La selezione ulteriore automatizzata e statistica degli outliers ha previsto l'applicazione della procedura automatica, sull'intero dataset calibrato delle velocità verticali, già utilizzata anche nel precedente rilievo 2011-2016, che permette di confrontare la velocità di spostamento verticale con il valore medio delle velocità in un determinato intorno del punto di misura. L'analisi è stata effettuata tramite *Kriging*, per il quale è stato individuato il variogramma dei dati di velocità media verticale calibrati, in modo da ottenere la differenza dei valori dei singoli punti di misura rispetto i corrispondenti valori dell'analisi spaziale. Si ottiene così lo scostamento tra valore misurato e valore atteso che deve essere nullo per confermare l'ipotesi di stazionarietà, necessaria per l'analisi tramite *Kriging*. Il raggio di cattura è definito sulla base del modello del variogramma, risultando essere un valore congruente con gli obiettivi dell'individuazione degli outlier locali. In zone a bassa densità di punti, dove non sia possibile raggiungere i requisiti minimi richiesti, l'algoritmo aumenta localmente il raggio di cattura e ai punti più vicini viene assegnato un peso maggiore rispetto ai punti più lontani. Mediante step ricorsivi di analisi, il dataset viene ripulito dagli outlier individuati e il dato modellato risulta sempre più aderente al dato misurato, garantendo la produzione di una mappa finale di migliore qualità.

In particolare sull'intero dataset di 704.444 pseudo-MP, comprensivo sia della zona di pianura sia della zona collinare e montana, sono stati individuati 942 potenziali outlier tra i quali sono stati confermati tutti i 145 individuati tramite la selezione iniziale. Il dataset relativo alla sola zona di pianura, dopo l'eliminazione degli outliers, è stato ritagliato sul poligono composto dal confine regionale a nord, dalla linea di costa ad est e per il resto dalla isolina 100 m s.l.m., considerando un buffer planimetrico esterno di 1.000 m, per evitare effetti di bordo nelle elaborazioni successive, ottenendo un dataset di 552.581 punti.

4.5 Realizzazione della cartografia dei movimenti verticali del suolo nella zona di pianura

La visualizzazione e restituzione cartografica dei dati per singolo punto di misura, oppure per pseudo-MP al fine di comporre le informazioni derivanti dalle due geometrie di osservazione dei satelliti, attraverso una scala di colori associata a diversi range di velocità come presentata nelle Figure 4.5 e 4.6, è utile ma per la zona di pianura presenta alcuni limiti che possono essere superati attraverso una spazializzazione dei dati stessi su una griglia regolare e restituzione di curve isocinetiche. I principali vantaggi possono essere:

- ottenere, per la sola zona di pianura, una cartografia dell'intero territorio che altrimenti sarebbe rappresentato solo dove sono presenti i punti di misura a terra e rimarrebbero scoperte le aree con una minore densità o assenza di punti di misura;
- confrontare i risultati ottenuti nei diversi periodi di monitoraggio mantenendo lo stesso grigliato di elaborazione;
- maggiore fruibilità da parte dei tecnici nella valutazione dell'estensione e della continuità delle zone di territorio interessate da velocità medio-alte di movimento verticale del suolo.

Pertanto, in continuità anche con quanto già svolto nelle precedenti attività di monitoraggio periodico dei movimenti verticali del suolo e della valutazione del fenomeno della subsidenza a scala regionale si è proceduto a realizzare, per la sola porzione di territorio regionale di pianura, per un totale di circa 10.897 km², la carta dei movimenti verticali del suolo 2016-2021 a curve isocinetiche con passo di 2.5 mm/anno, adottando il seguente procedimento:

- è stato utilizzato il dataset finale dell'analisi interferometrica calibrata 2016-2021, ritagliato secondo il confine regionale e la linea di quota 100 m s.l.m., con un buffer di 1 km che consentisse di limitare gli effetti “di bordo”, depurato degli outliers, per un totale di 552.581 punti di misura;
- è stata verificata la presenza di aree scoperte da punti di misura e possibilità di recuperare informazioni per aumentare il controllo in queste aree nella fase successiva di spazializzazione dei dati;
- è stata eseguita una spazializzazione dei dati con tecnica *Kriging* producendo un grigliato con maglia di dimensioni pari a 100x100 m e co-registrato con i grigliati calcolati nei precedenti periodi di monitoraggio, al fine di supportare le comparazioni dei risultati in ambiente GIS;
- sono state eliminate dal grigliato calcolato e quindi dalla cartografia finale, le aree occupate dalle acque superficiali di transizione, come ad esempio le Valli di Comacchio;
- è stata realizzata la cartografia finale attraverso il processo di *contour* in ambiente GIS, restituendo curve isocinetiche con passo di 2,5 mm/anno.

In merito alla presenza di aree scoperte da punti di misura è stata evidenziata una vasta zona del ferrarese nell'area della Valle del Mezzano (Figura 4.7), nella quale sono stati recuperati e opportunamente inseriti nel dataset per l'elaborazione finale, alcuni punti di misura in singola geometria che non avevano restituito dati in doppia geometria e pertanto erano stati eliminati dal dataset. I punti recuperati e ritenuti significativi sono rappresentati in Figura 4.7, e hanno consentito di ottenere una migliore interpolazione finale del grigliato 100x100 m nell'area della Valle del Mezzano.

Nell'Allegato 1 si riporta la cartografia finale delle velocità di movimento verticale del suolo della zona di pianura dell'Emilia-Romagna nel periodo 2016-2021.

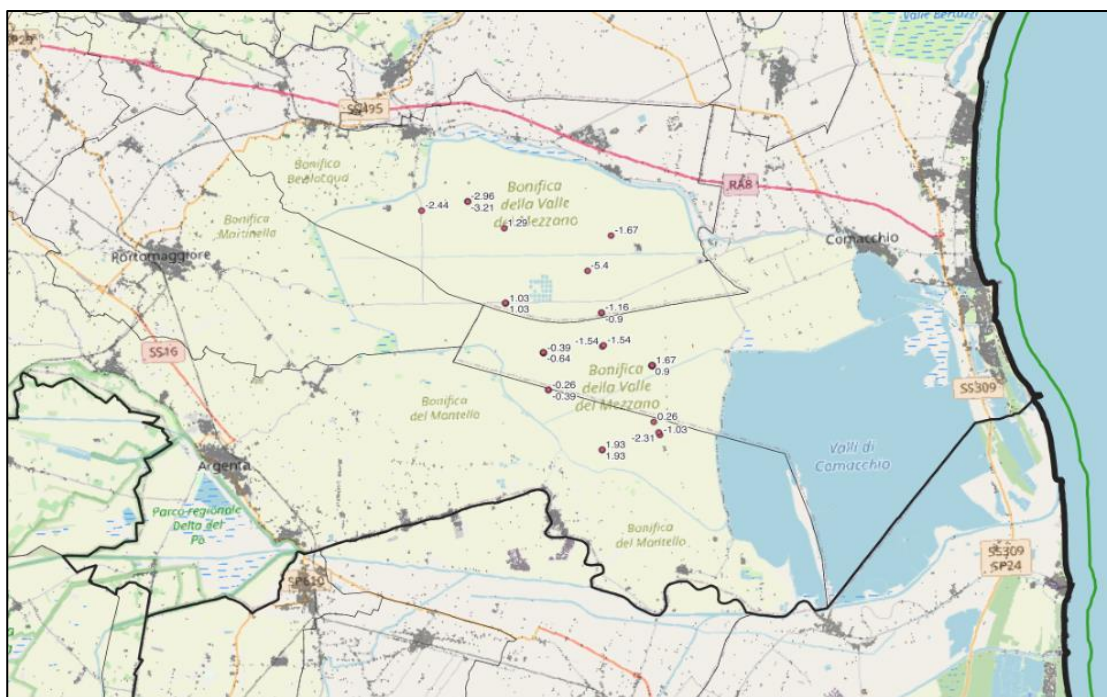


Figura 4.7: Implementazione manuale di alcuni punti in singola geometria nell'area della Valle del Mezzano.

5. Analisi dei movimenti verticali del suolo 2016-2021

La cartografia dei movimenti verticali del suolo nella pianura dell'Emilia-Romagna per il periodo 2016-2021 (Figura 5.1 e Allegato 1) evidenzia limitate zone in sollevamento, ampie zone con velocità prossime allo zero e un'area a nord di Bologna e altri areali con estensioni più limitate caratterizzati da velocità di abbassamento del suolo – subsidenza.

Le elaborazioni che hanno portato alla cartografia si basano, come già detto, su un grigliato avente maglia di 100x100 m, e di seguito verrà analizzata la variabilità del dataset anche in relazione ai periodi di monitoraggio precedenti (2006-2011 e 2011-2016), svolti con la medesima tecnica di rilievo interferometrico e di restituzione cartografica, anche se nell'ultimo periodo (2016-2021) si è ricorsi alla doppia geometria di acquisizione dei dati SAR. Per poter effettuare il confronto del periodo più recente con i precedenti e analizzare le differenze temporali intercorse nei diversi areali regionali e provinciali, si è proceduto ad una attività preliminare di riallineamento dei dataset precedenti rispetto all'ultimo, tenendo conto, in particolare, delle modifiche al confine regionale nel frattempo intercorse nella Provincia di Rimini, all'esclusione dalle precedenti elaborazioni degli areali occupati dalle acque di transizione. Ciò ha permesso di analizzare il fenomeno dei movimenti del suolo anche attraverso la distribuzione di frequenza dei valori delle singole maglie 100x100 m e confrontare anche i principali indici delle distribuzioni.

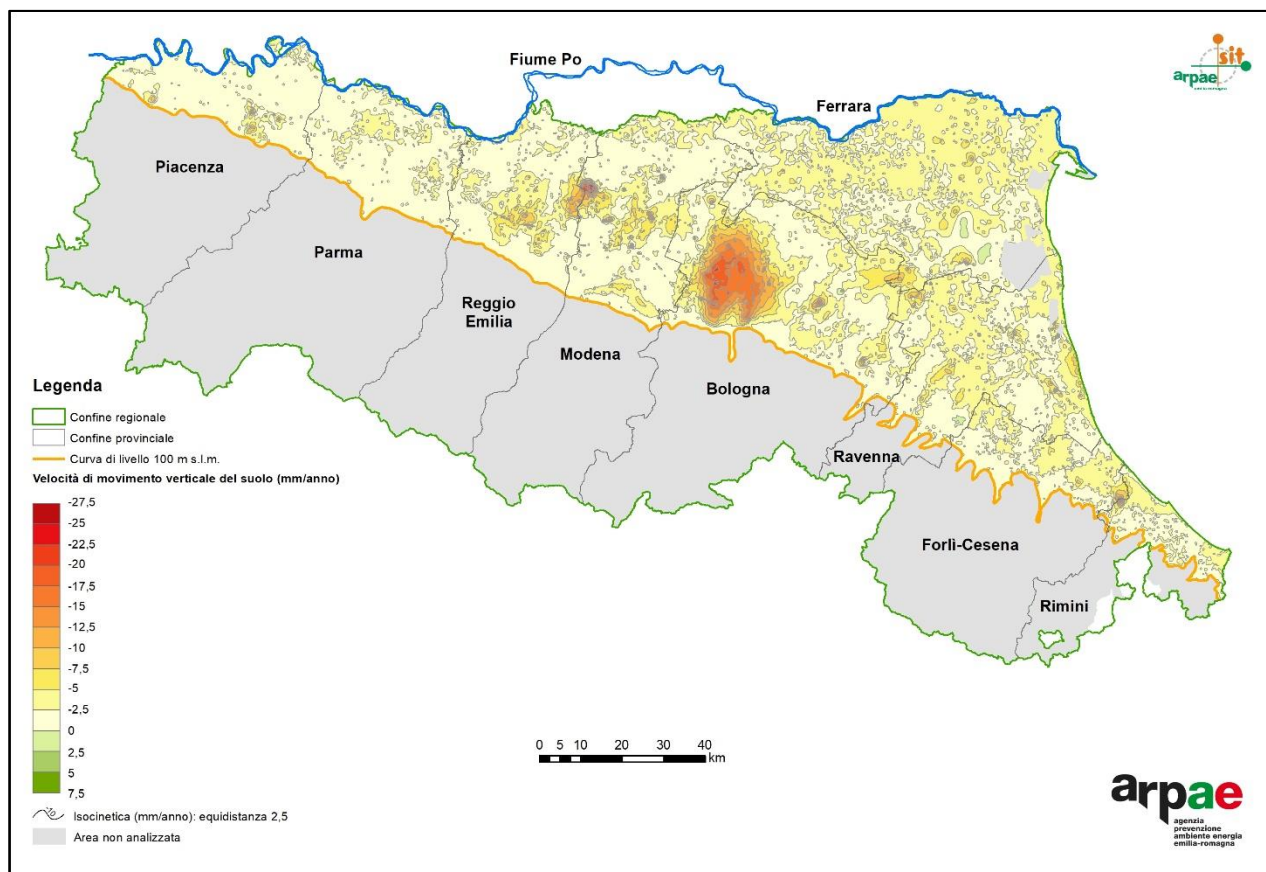


Figura 5.1: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 (Allegato 1).

Nel periodo 2016-2021 risulta che la velocità media verticale del suolo nella porzione di pianura è compresa tra 0 e -5 mm/anno nell'89,6% del territorio, il 6,1% nella classe -5 e -10 mm/anno e il 2,9% nelle classi con velocità inferiore a -10 mm/anno (Tabella 5.1). A scala regionale, dal 2006 al 2021, è progressivamente diminuita la classe di velocità da 5 a 0 mm/anno (in sollevamento) aumentando contestualmente la classe di velocità da 0 a -5 mm/anno, e si sono ridotte le classi con

velocità di subsidenza più elevate, fino a dimezzare nell'ultimo periodo quella da -5 a -10 mm/anno rispetto il periodo 2006-2011.

Tabella 5.1: Superficie di pianura dell'Emilia-Romagna per classe di velocità di movimento verticale e relativa percentuale sul totale nei 3 periodi di monitoraggio dal 2006 al 2021

Velocità di movimento verticale (mm/anno)	2006-2011		2011-2016		2016-2021	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
da 10 a 5	0,00	0,000	2,470	0,020	0,010	0,000
da 5 a 0	2014,34	18,490	1630,520	14,960	155,320	1,430
da 0 a -5	6964,07	63,910	8605,210	78,970	9763,990	89,610
da -5 a -10	1324,76	12,160	573,440	5,260	660,700	6,060
da -10 a -15	261,05	2,400	76,710	0,700	178,630	1,640
da -15 a -20	159,65	1,470	7,390	0,070	131,180	1,200
da -20 a -25	95,62	0,880	0,540	0,000	6,310	0,060
da -25 a -30	54,92	0,500	0,030	0,000	0,170	0,000
da -30 a -35	21,88	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
da -35 a -40	0,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Totale	10896,31	100	10896,31	100	10896,31	100

La distribuzione di frequenza dei valori di velocità di movimento per il periodo 2016-2021 è infatti compresa tra 5,15 mm/anno e -27,29 mm/anno, con un valore mediano pari a -2,37 mm/anno (Figura 5.2). Rispetto al precedente periodo 2011-2016 i valori minimi di velocità sono confrontabili, mentre risultano più bassi se confrontati con i minimi di velocità del periodo 2006-2011, quando hanno raggiunto valori di subsidenza di -35,05 mm/anno. I valori mediani di velocità dell'ultimo periodo risultano a scala regionale di poco più bassi rispetto i periodi precedenti.

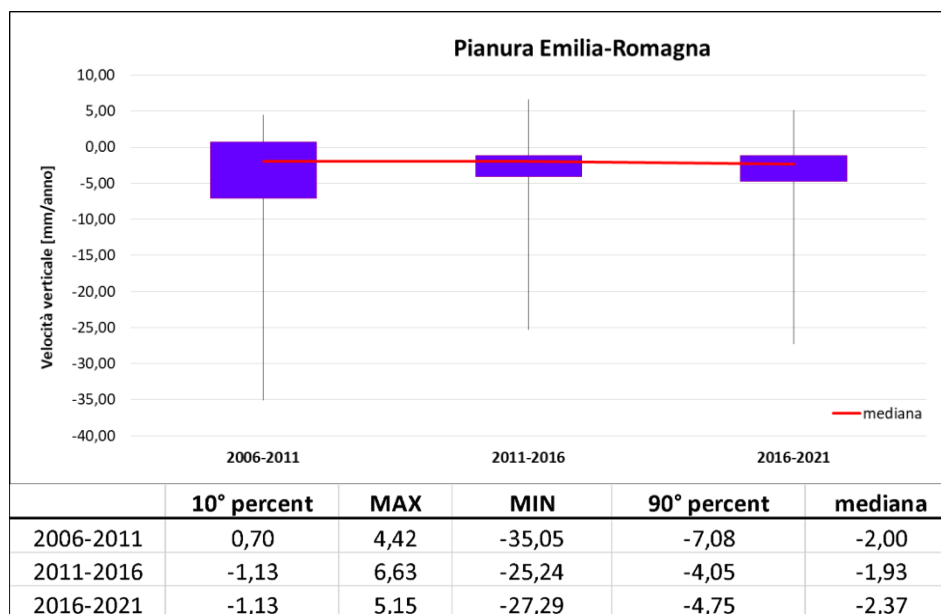


Figura 5.2: Distribuzione di frequenza delle velocità verticali del suolo dal 2006 al 2021

La distribuzione di frequenza delle velocità verticali nel periodo 2016-2021 per singolo territorio provinciale e il confronto con le mediane dei periodi precedenti è riportata in Figura 5.3. I valori minimi di velocità (massima subsidenza) si riscontrano in provincia di Modena e a seguire Bologna,

mentre quest'ultima presenta una maggiore variabilità dei valori (10°-90° percentile) a scala regionale.

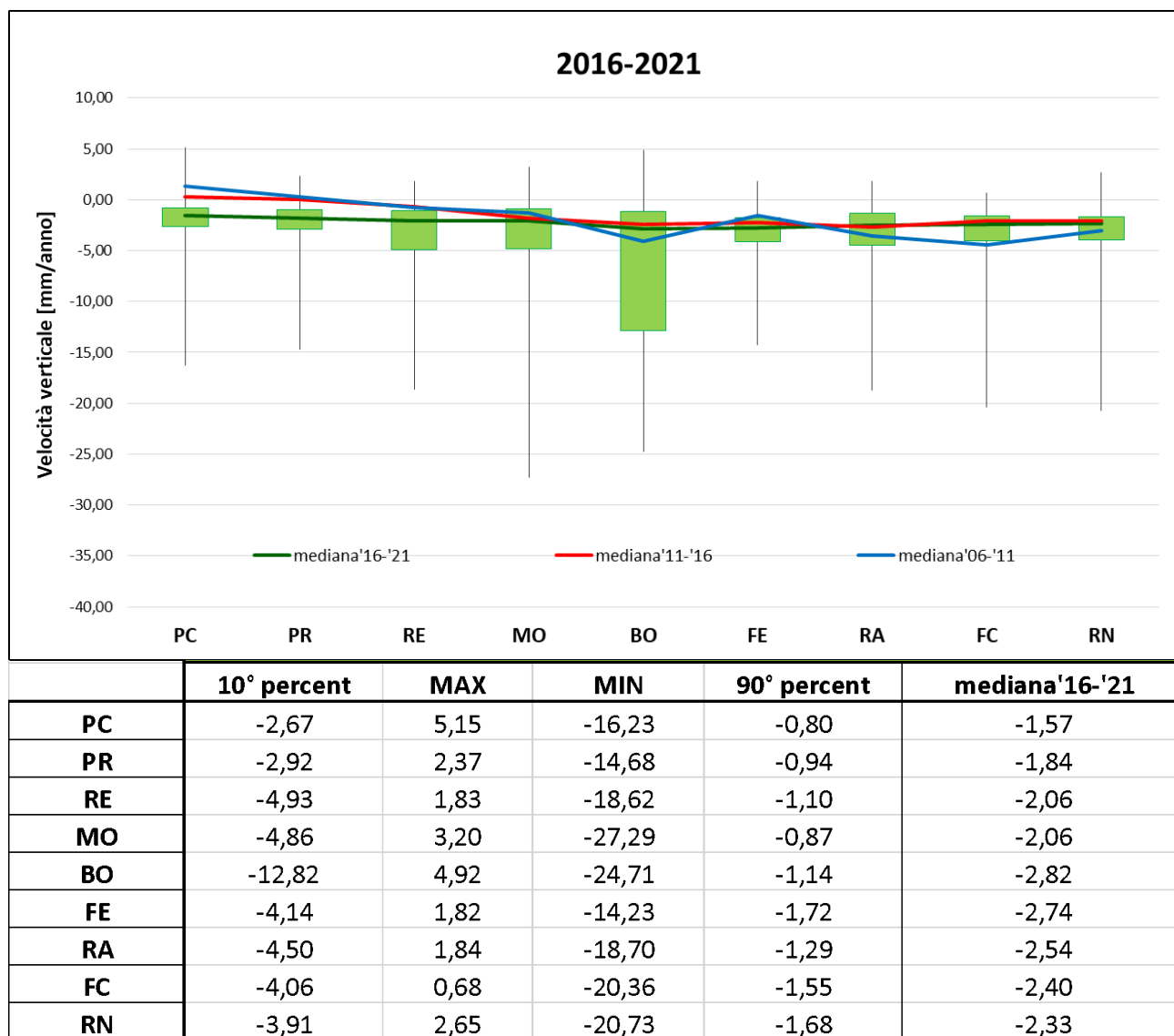


Figura 5.3: Distribuzione di frequenza delle velocità verticali del suolo 2016-2021 per ambito provinciale

Per evidenziare ulteriormente l'evoluzione del fenomeno a scala provinciale, si riporta in Figura 5.4 l'andamento nei 3 periodi, dal 2006 al 2021, delle classi di velocità verticale del suolo, dalle quali è possibile evidenziare per la zona emiliana, Piacenza, Parma, Reggio Emilia e solo in parte per Modena e Ferrara, una progressiva diminuzione delle classi positive in sollevamento e un incremento della classe di velocità da -5 a 0 mm/anno, ovvero in leggero abbassamento. Nel territorio romagnolo, in particolare Ravenna, Forlì-Cesena e solo in parte Rimini, si osserva invece una progressiva diminuzione del fenomeno di subsidenza con prevalente diminuzione della classe da -10 a -5 mm/anno a favore della classe da -5 a 0 mm/anno. Nel bolognese si registra, in generale, una situazione in miglioramento sul lungo periodo (dal 2006-2011 al 2016-2021), con attenuazione delle classi di velocità medio-alta di subsidenza a favore della classe da -5 a 0 mm/anno. Il periodo 2011-2016 ha invece rappresentato per l'areale della provincia di Bologna una situazione particolare di forte ridimensionamento del fenomeno della subsidenza con diverse zone caratterizzate da velocità verticali positive.

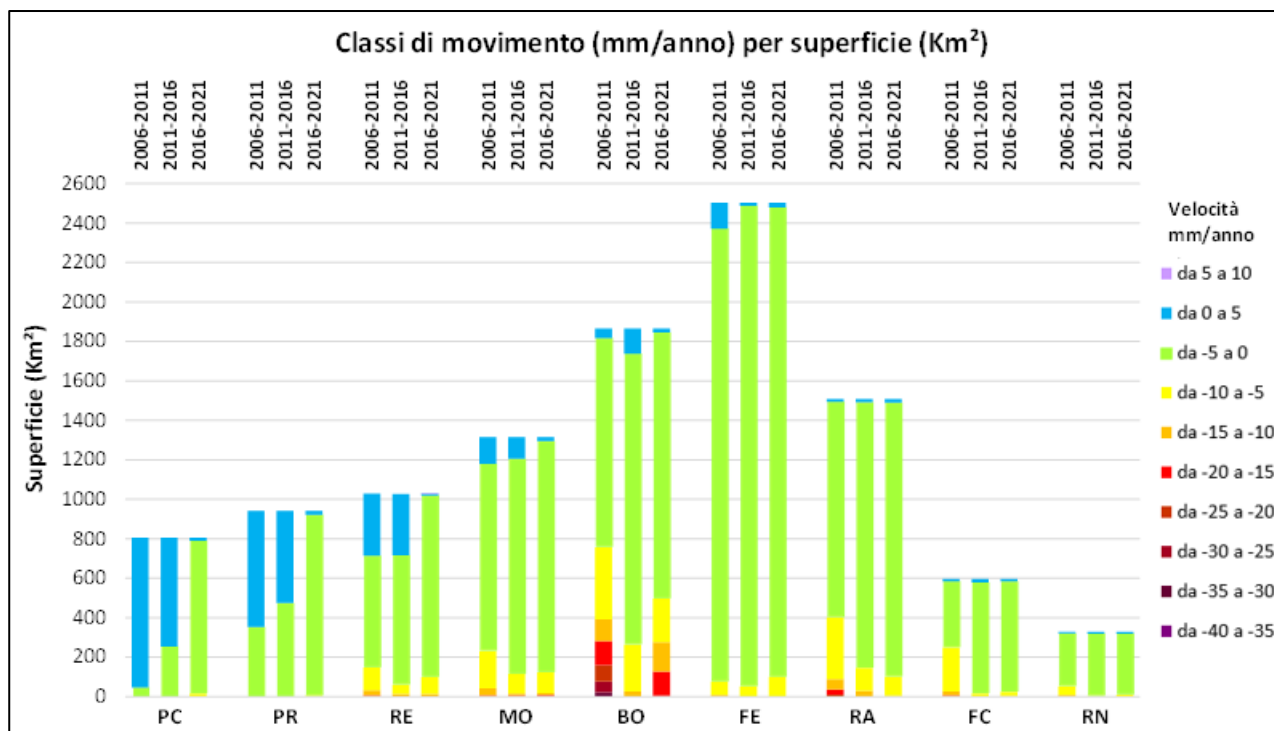


Figura 5.4: Istogrammi delle superfici provinciali suddivise per classi di movimento (mm/anno) relative ai periodi 2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021.

5.1 Analisi delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo

Per analizzare le variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dell'ultimo periodo rispetto al 2011-2016, è stata realizzata la cartografia di Figura 5.5 e Allegato 2. Nella carta sono rappresentate le variazioni di velocità verticale tra i due periodi, dove in positivo sono rappresentate le aree che nel periodo recente sono migliorate rispetto al 2011-2016, al contrario con valori negativi le situazioni che sono peggiorate. Come già evidenziato nel paragrafo precedente le province emiliane fino a Reggio Emilia presentano una diffusa variazione negativa, mentre in passato avevano sempre evidenziato tendenze medie alla risalita della superficie topografica; Bologna presenta l'ampio areale a nord della città con variazione negativa mentre a est di Bologna si evidenziano piccoli areali alcuni in miglioramento altri in peggioramento. Modena, Ravenna e Ferrara presentano anch'esse alcuni areali in miglioramento, come anche Ravenna che presenta le zone più estese in miglioramento anche lungo la costa, e zone molto limitate e frammentate in peggioramento. Infine al confine tra Cesena e Rimini si evidenzia una zona in peggioramento.

In Tabella 5.2 e Figura 5.6 sono riportate le superfici espresse in km² e in percentuale, relative alla variazione di velocità di movimento del suolo tra il periodo 2006-2011 e 2011-2016, tra il periodo 2006-2011 e quello più recente 2016-2021 e infine la variazione tra gli ultimi 2 periodi 2011-2016 e 2016-2021, raggruppate in 3 classi: la prima è relativa alle superfici interessate da variazioni con tendenza negativa (incremento dell'abbassamento), la seconda è relativa alle superfici interessate da variazioni comprese tra 0 e $\pm 2,5$ mm/anno (indice di una sostanziale stabilità tra i due periodi considerati) e la terza è relativa alle superfici interessate da variazioni con tendenza positiva (riduzione dell'abbassamento).

Le variazioni più recenti, quelle 2011-2016 e 2016-2021, evidenziano che l'85,48% del territorio di pianura non presenta variazioni di tendenza significative, l'11,17% è interessato da un incremento dell'abbassamento, mentre una tendenza alla riduzione degli abbassamenti si evidenzia per il 3,36 % della superficie. Quanto osservato per gli ultimi 2 rilievi, sono pressoché invertite, a parte la classe di stabilità, se si considerano le variazioni tra i periodi 2006-2011 e 2011-2016, l'80,61% del territorio

analizzato non presentava variazioni di tendenza significative, il 2,78% era interessato da abbassamento, mentre il 16,61% della superficie regionale evidenziava una tendenza all'innalzamento.

Se si considera invece la variazione di lungo periodo, ovvero le variazioni tra il primo e l'ultimo periodo di monitoraggio (2006-2011 e 2016-2021) risulta che le variazioni non significative rappresentano il 75,32% del territorio di pianura, il 13,01% risulta in peggioramento e l'11,68% è in miglioramento. In altre parole le variazioni di velocità verticale avvenute nel periodo più recente rispetto a quelle di lungo periodo, evidenziano una maggiore stabilità del fenomeno con relativa riduzione delle aree in peggioramento e significativa riduzione di quelle in miglioramento.

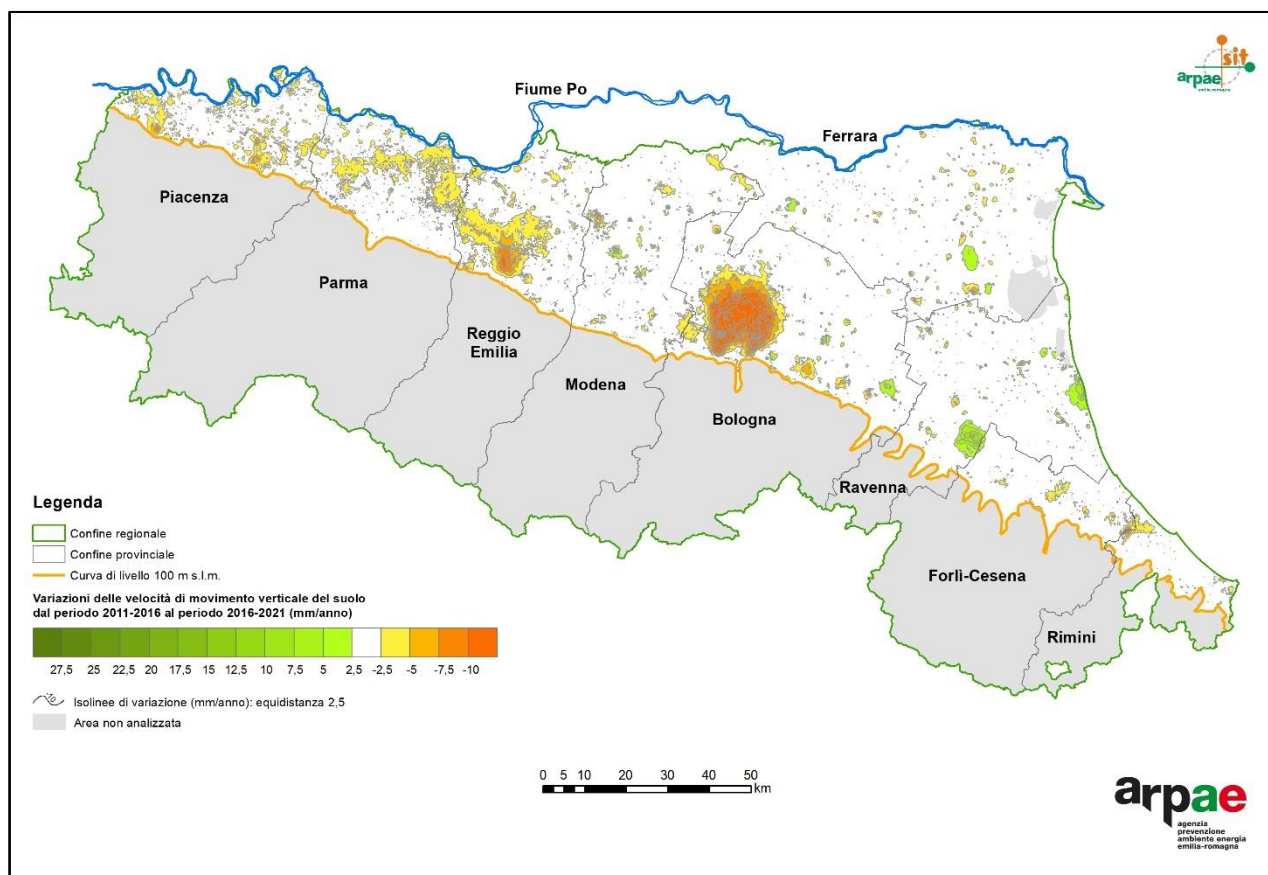


Figura 5.5: Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2011-2016 al periodo 2016-2021 (Allegato 2).

Tabella 5.2: Superficie di pianura per classi di variazione di velocità verticale e relative percentuali dal 2006 al 2021. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo)

Variazione di Velocità di movimento verticale (mm/anno)	2006-2011 ÷ 2011-2016		2011-2016 ÷ 2016-2021		2006-2011 ÷ 2016-2021	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
> 2,5	1810,06	16,61	365,91	3,36	1272,34	11,68
da 2,5 a -2,5	8783,40	80,61	9313,81	85,47	8206,89	75,31
< -2,5	302,85	2,78	1216,59	11,17	1417,08	13,01
Totale	10896,31	100	10896,31	100	10896,31	100

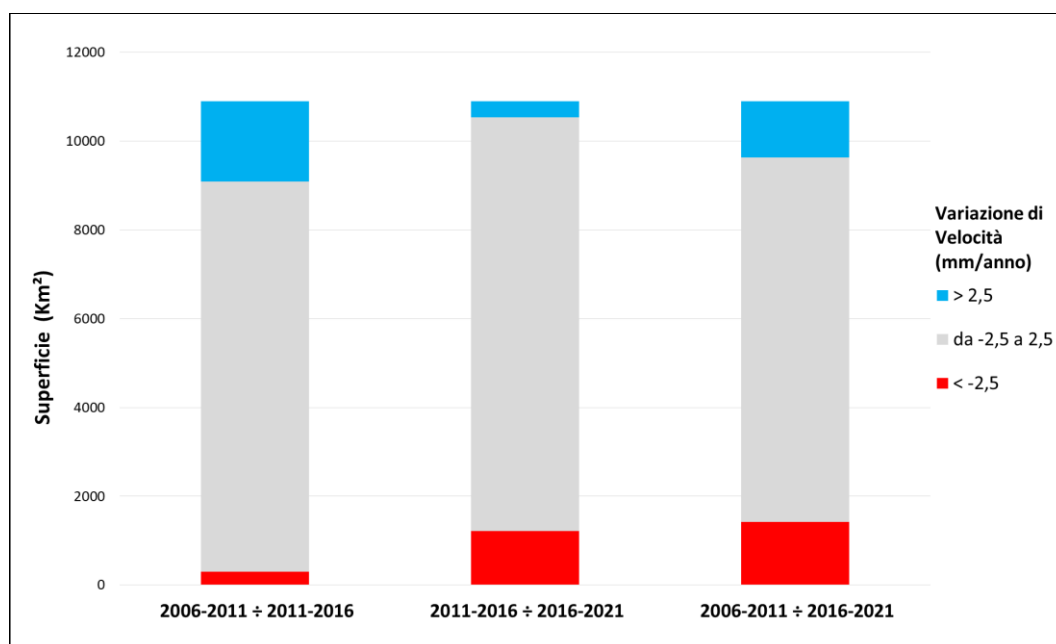


Figura 5.6: Superficie di pianura per classi di variazione di velocità verticale e relative percentuali tra periodi dal 2006 al 2021. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo)

Le variazioni osservate a scala regionale sono di seguito analizzate a scala provinciale per i diversi periodi di monitoraggio. Le variazioni più recenti (2011-2016 e 2016-2021) delle velocità verticali evidenziano per le province di Piacenza, Parma, Reggio Emilia e Bologna un incremento degli abbassamenti che supera il 20%, mentre Modena, Ferrara, Forlì-Cesena e Rimini si caratterizzano per oltre il 90% della superficie stabile, mentre Ravenna presenta il 18,49% in miglioramento (Tabella 5.3 e Figura 5.7).

Tabella 5.3 - Superfici provinciali suddivise per classi di variazione di velocità verticale dal 2011-2016 al 2016-2021 e relative percentuali. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo).

Variazione di Velocità di movimento verticale (mm/anno) 2011-2016 ÷ 2016-2021	PC (%)	PR (%)	RE (%)	MO (%)	BO (%)	FE (%)	RA (%)	FC (%)	RN (%)
> 2,5	0,08	0,00	0,37	1,29	1,62	1,26	18,49	0,53	0,20
da 2,5 a -2,5	78,39	77,89	75,57	93,73	77,29	96,28	80,57	94,22	93,50
< -2,5	21,53	22,11	24,06	4,98	21,09	2,46	0,94	5,25	6,30
TOTALE	100	100	100	100	100	100	100	100	100

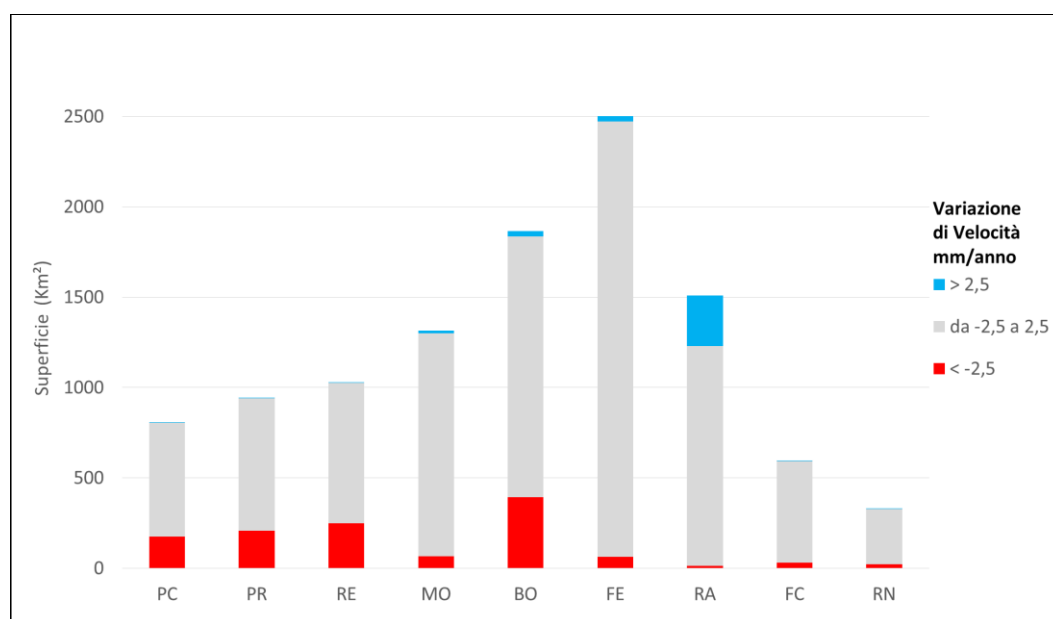


Figura 5.7: Superficie di pianura per classi di variazione di velocità verticale dal 2011-2016 al 2016-2021. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo)

Le variazioni delle velocità verticali dei territori provinciali osservate nel lungo periodo (2006-2011 e 2016-2021) evidenziano una elevata stabilità per Ravenna, Ferrara, Rimini e in subordine Modena che raggiunge l'81,56%, mentre Forlì-Cesena e Bologna rappresentano le province con la più alta superficie in miglioramento (rispettivamente 39,61% e 32,77%). Le variazioni invece negative sono relative al territorio di Piacenza, che raggiunge il 73,51%, seguita da Parma con il 32,02% e Reggio Emilia (16,08%) (Tabella 5.4 e Figura 5.8).

Tabella 5.4 - Superfici provinciali suddivise per classi di variazione di velocità verticale dal 2006-2011 al 2016-2021 e relative percentuali. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo).

Variazione di Velocità di movimento verticale (mm/anno) 2006-2011 ÷ 2016-2021	PC (%)	PR (%)	RE (%)	MO (%)	BO (%)	FE (%)	RA (%)	FC (%)	RN (%)
> 2,5	0,01	0,00	9,59	12,99	32,77	1,26	5,33	39,61	13,14
da 2,5 a -2,5	26,48	67,98	74,33	81,56	65,68	89,57	93,08	60,31	86,10
< -2,5	73,51	32,02	16,08	5,45	1,55	9,17	1,59	0,08	0,76
TOTALE	100	100	100	100	100	100	100	100	100

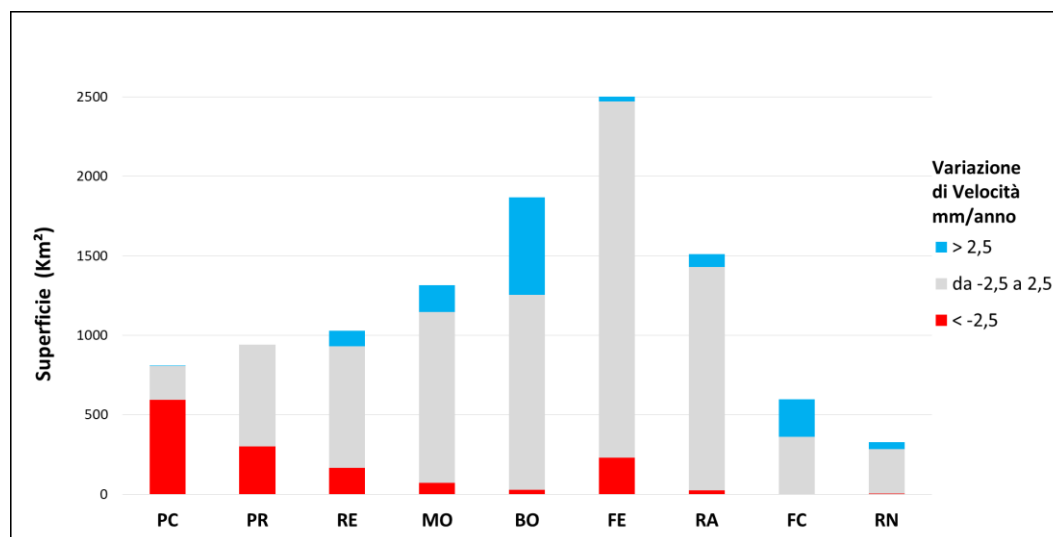


Figura 5.8: Superficie di pianura per classi di variazione di velocità verticale dal 2006-2011 al 2016-2021. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo)

Le variazioni di velocità nei periodi 2006-2011 e 2011-2016 evidenziano, come già detto a scala regionale, una elevata e generalizzata stabilità e miglioramento: quest'ultimo ha raggiunto i suoi massimi valori a Forlì-Cesena con il 49,74% e Bologna con il 38,26%, a seguire Rimini, Ravenna, Reggio Emilia e Modena. (Tabella 5.5 e Figura 5.9). Ferrara, a fronte di una elevata percentuale di stabilità, presenta la massima percentuale di peggioramento pari al 6,23% dell'intero territorio provinciale.

Tabella 5.5 - Superfici provinciali suddivise per classi di variazione di velocità verticale dal 2006-2011 al 2011-2016 e relative percentuali. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo).

Variazione di Velocità di movimento verticale (mm/anno <i>2006-2011 ÷ 2011-2016</i>)	PC (%)	PR (%)	RE (%)	MO (%)	BO (%)	FE (%)	RA (%)	FC (%)	RN (%)
> 2,5	0,22	2,56	18,33	14,80	38,26	1,95	18,48	49,74	19,04
da 2,5 a -2,5	94,84	96,61	81,28	80,47	60,73	91,82	80,58	50,26	80,96
< -2,5	4,94	0,83	0,39	4,73	1,01	6,23	0,94	0,00	0,00
TOTALE	100	100	100	100	100	100	100	100	100

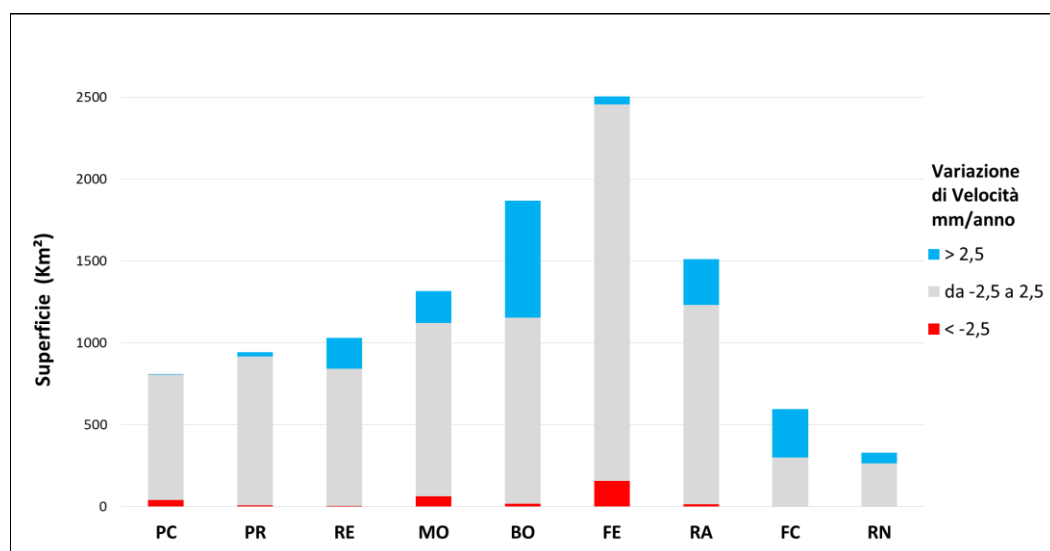


Figura 5.9: Superficie di pianura per classi di variazione di velocità verticale dal 2006-2011 al 2011-2016. (Variazioni positive indicano un miglioramento nel tempo)

5.2 Provincia di Piacenza

Nella provincia di Piacenza si riscontra una progressiva e lenta riduzione delle aree in sollevamento, che aveva caratterizzato questo territorio fino al 2016. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -1,57 mm/anno rispetto a +1,34 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.10 e 5.11). Alcune zone limitate sono ancora in sollevamento e sono ubicate lungo il fiume Po nel tratto prospiciente Cremona. Le zone con valori negativi sono invece relativamente localizzate, una compresa tra le località Mottaziana e Gragnano Trebbiense e una tra Pontenure, Carpaneto Piacentino e Fiorenzuola d'Arda.

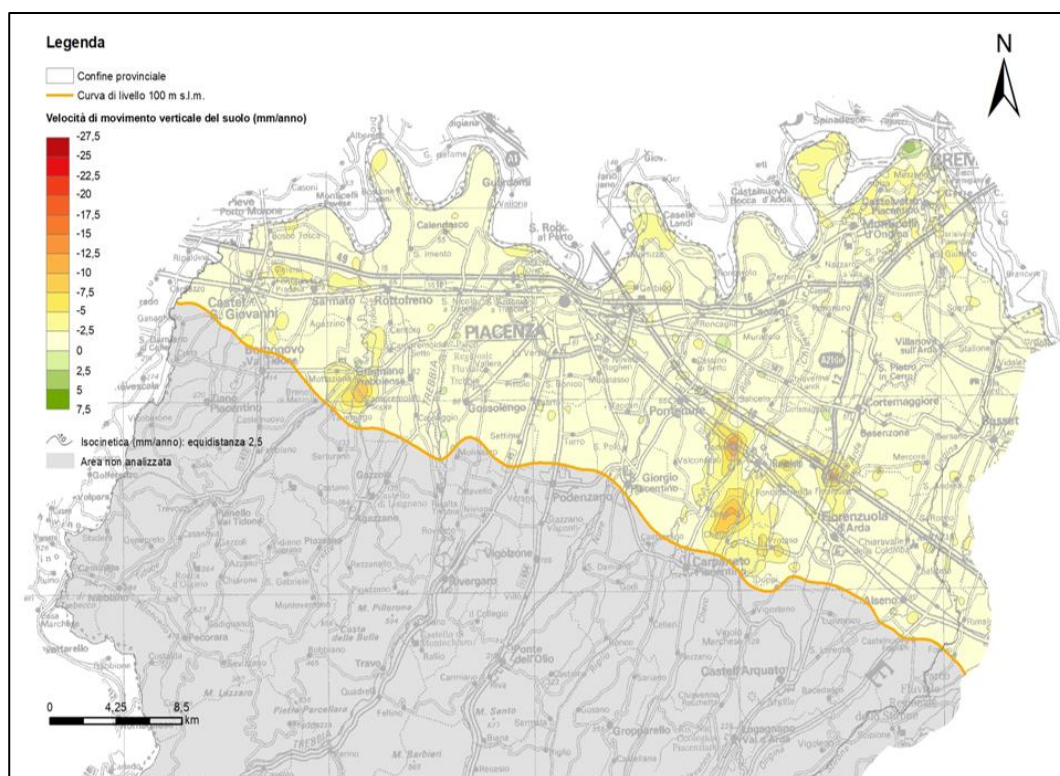


Figura 5.10: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Piacenza.

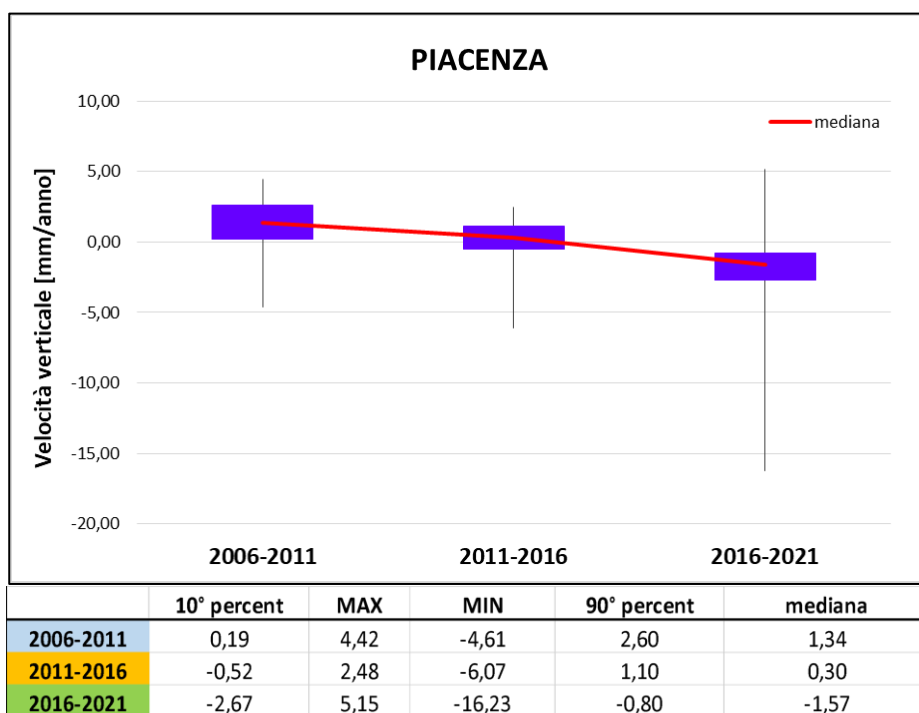


Figura 5.11: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Piacenza.

5.3 Provincia di Parma

Nella provincia di Parma si riscontra quanto già osservato per il territorio di Piacenza, ovvero una progressiva e lenta riduzione delle aree in sollevamento, che aveva caratterizzato questo territorio fino al 2016. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a

-1,84 mm/anno rispetto a 0,28 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.12 e 5.13). Le aree in sollevamento sono ora pressoché assenti, mentre quelle con valori negativi e comunque di modesta entità sono molto localizzate e pertanto non si riscontrano areali critici di dimensioni significative.

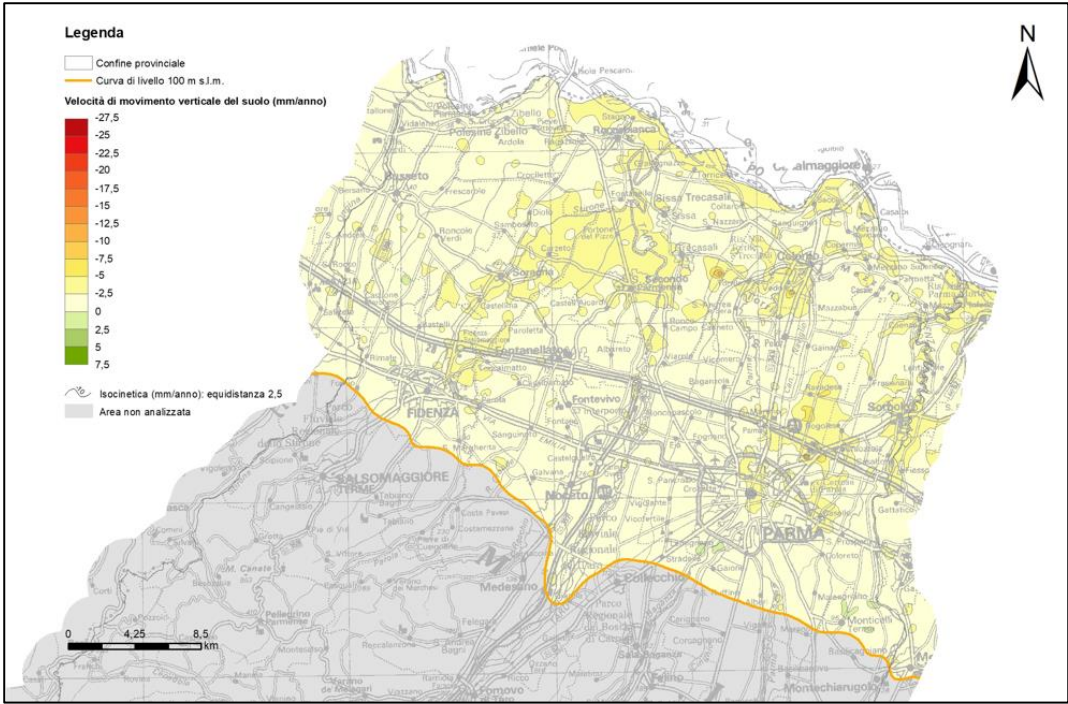


Figura 5.12: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Parma.

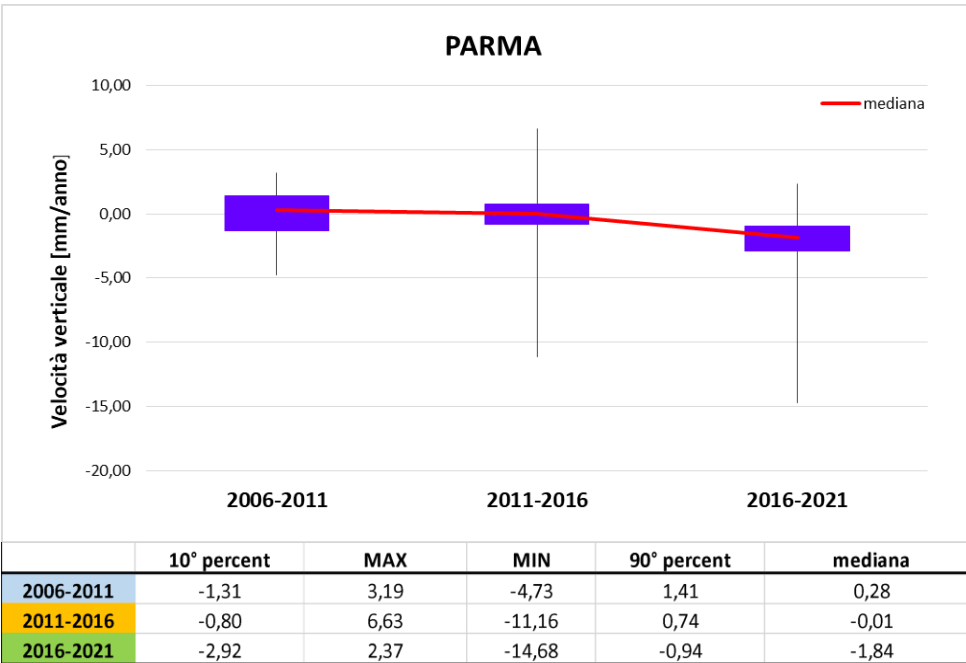


Figura 5.13: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Parma.

5.4 Provincia di Reggio Emilia

Nella provincia di Reggio Emilia si riscontra, dopo una breve riduzione generalizzata degli abbassamenti nel periodo 2011-2016, un leggero incremento degli abbassamenti che però a scala

provinciale non hanno raggiunto i minimi registrati nel periodo 2006-2011. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,06 mm/anno rispetto a -0,78 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.14 e 5.15). Le aree in sollevamento sono pressoché assenti e comunque arealmente poco significative, mentre persistono 2 zone in abbassamento: una è l'area industriale a nord del capoluogo con valori massimi simili a quelli riscontrati nel passato pari a circa 10 mm/anno e l'altra è l'area industriale a est di Correggio con valori che risultano nell'ultimo periodo in peggioramento rispetto il passato. La carta delle variazioni di velocità evidenzia anche una zona in incremento a ovest del centro urbano di Reggio Emilia. Il capoluogo risulta invece sostanzialmente stabile.

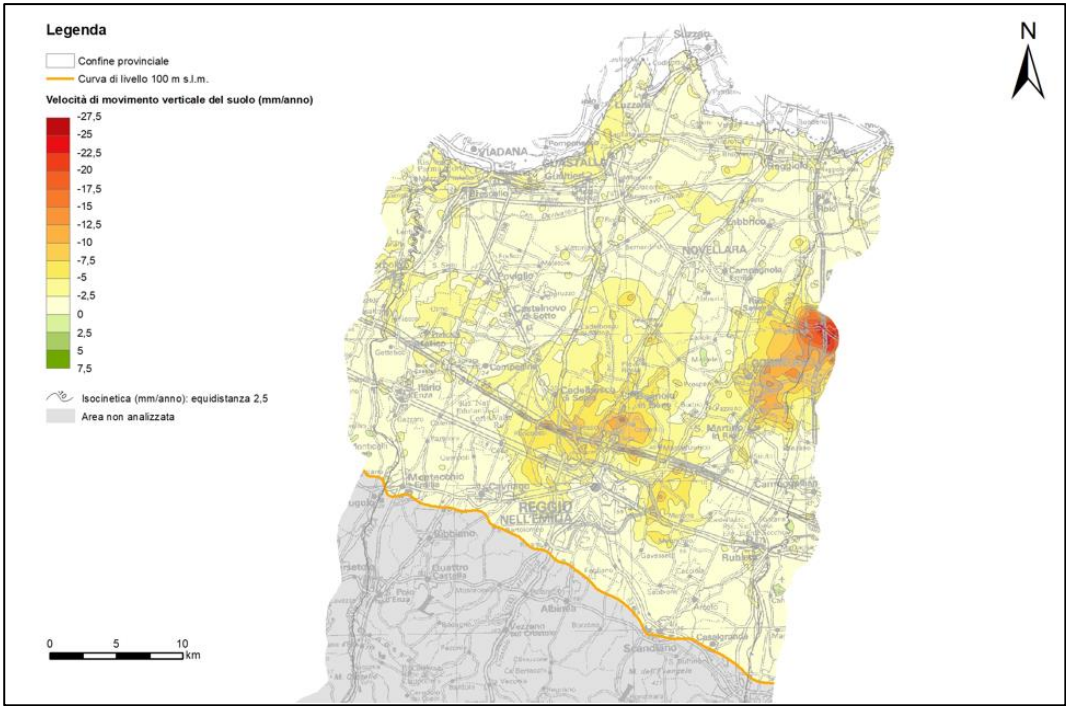


Figura 5.14: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Reggio Emilia.

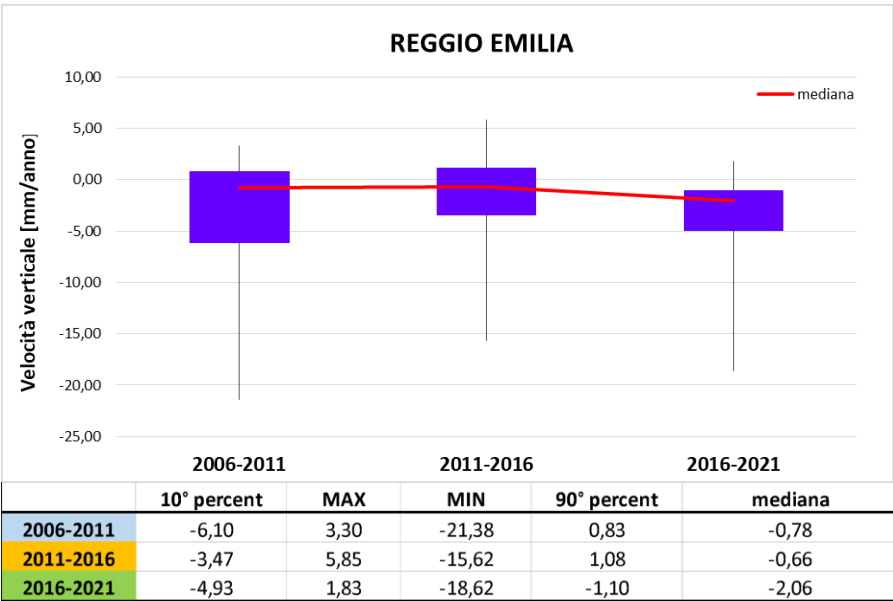


Figura 5.15: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Reggio Emilia.

5.5 Provincia di Modena

Nella provincia di Modena si riscontra una situazione pressoché stabile negli ultimi 2 periodi di monitoraggio. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,06 mm/anno rispetto a -1,31 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.16 e 5.17). Le aree in sollevamento sono pressoché assenti e comunque arealmente poco significative, mentre persistono velocità elevate in corrispondenza delle aree artigianali ad ovest di Carpi, territorio contiguo alla criticità osservata per Reggio Emilia. Altri areali critici ma di ridotte dimensioni sono ubicati a sud di Soliera e a Bomporto le cui velocità nell'ultimo periodo risultano in attenuazione, come anche l'area a nord del capoluogo. La città di Modena risulta sostanzialmente stabile.

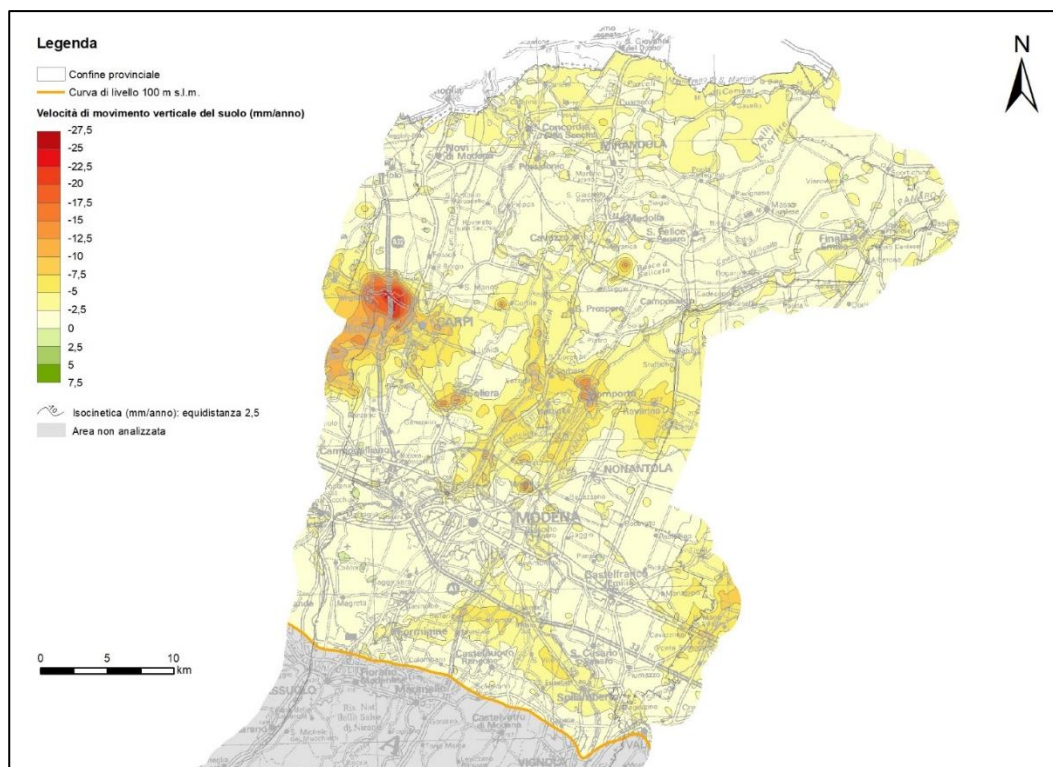


Figura 5.16: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Modena.

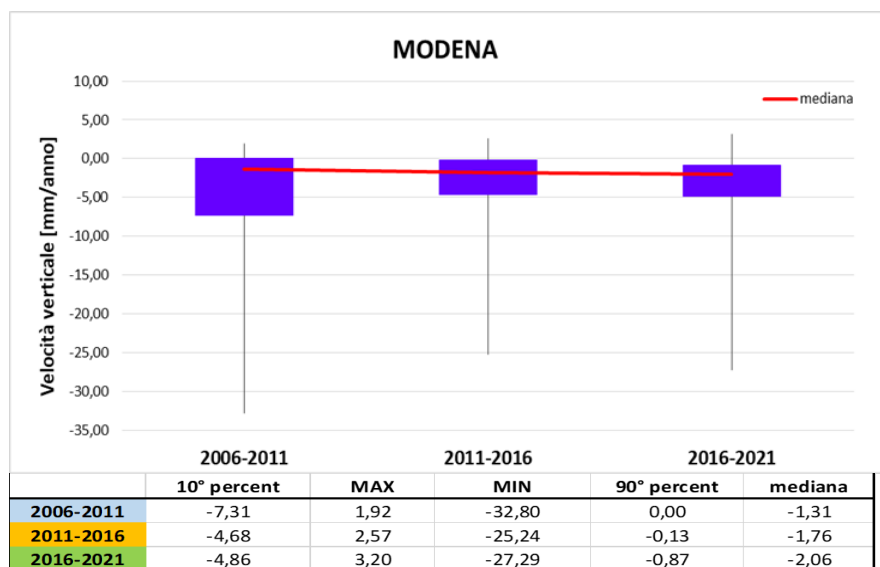


Figura 5.17: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Modena.

5.6 Provincia di Bologna

Nella provincia di Bologna, in particolare la zona di pianura a nord del capoluogo, ha registrato storicamente valori elevati di subsidenza che nel tempo sono sempre risultati in progressiva diminuzione, e nel precedente rilievo 2011-2016 sono risultati in forte diminuzione e in alcuni areali si sono registrate anche velocità positive (in sollevamento). La situazione attuale fa registrare invece un incremento degli abbassamenti in tutto l'areale storicamente critico, ma con tassi meno elevati rispetto il passato. La mediana infatti della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,82 mm/anno rispetto a -4,05 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.18, Allegato 3 e 5.19), tenendo conto che essendo l'areale critico a nord di Bologna molto esteso arealmente, influenza significativamente la distribuzione delle velocità dell'intera provincia. Le aree in sollevamento sono pressoché assenti e comunque arealmente poco significative. Altri areali con criticità relativa e con estensione seppure più ridotta comunque significativa sono ubicati a Budrio e a sud di Castel Guelfo. Le variazioni di velocità recenti evidenziano che le velocità nell'areale di Budrio sono in attenuazione, mentre a sud di Castel Guelfo sono in leggero incremento. Altro areale in incremento risulta a nord di Ozzano dell'Emilia.

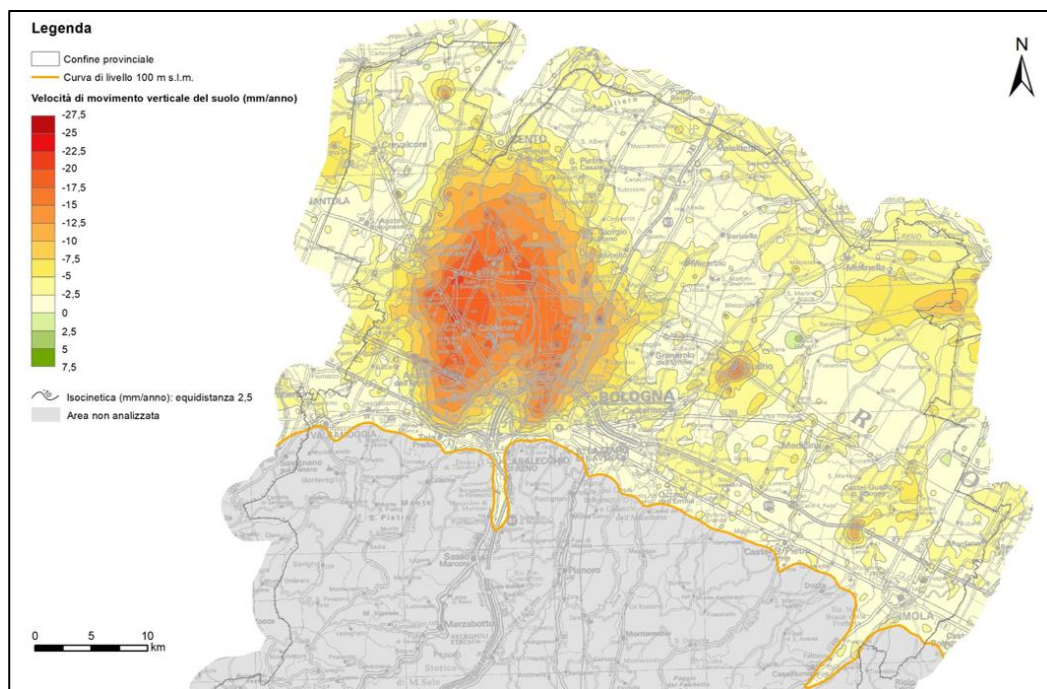


Figura 5.18: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Bologna (Allegato 3)

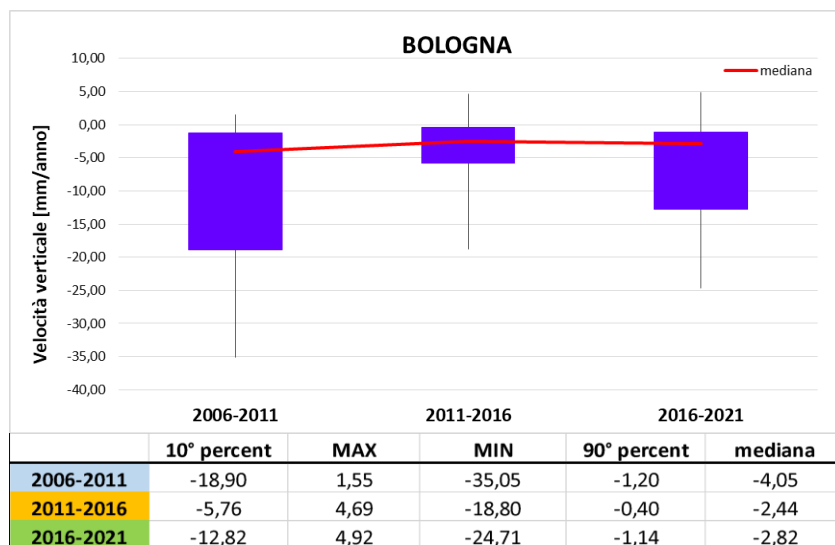


Figura 5.19: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Bologna.

5.7 Provincia di Ferrara

Nella provincia di Ferrara si riscontra una situazione pressoché stabile negli ultimi 2 periodi di monitoraggio e anche i minimi registrati nei diversi periodi sono confrontabili. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,74 mm/anno rispetto a -1,56 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.20 e 5.21). Le aree in sollevamento sono prevalentemente ubicate in prossimità delle Valli del Mezzano, per il resto sono assenti o comunque arealmente poco significative.

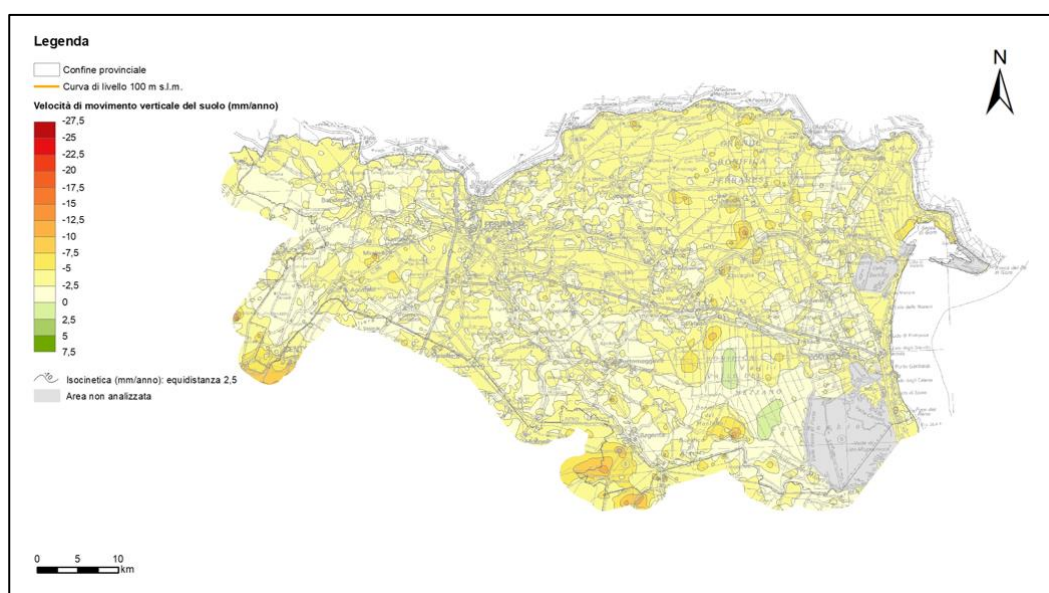


Figura 5.20: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Ferrara.

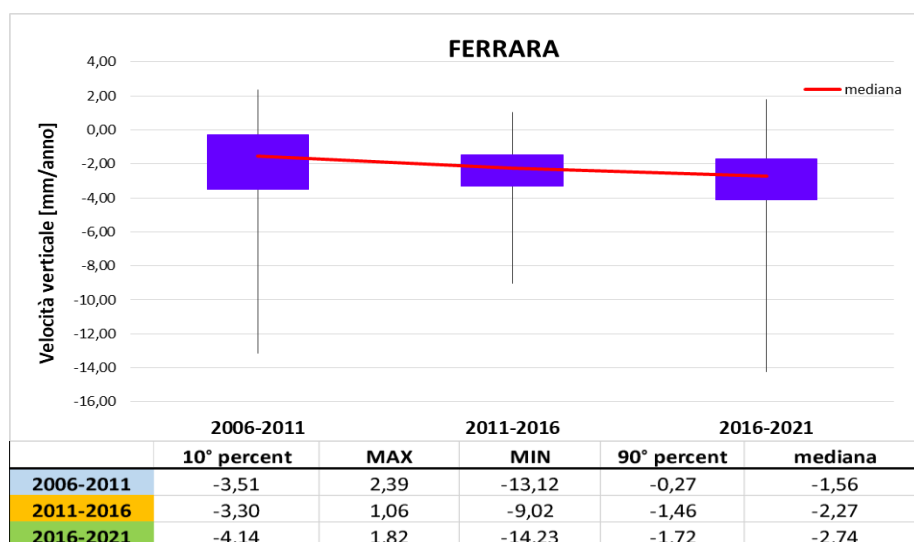


Figura 5.21: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Ferrara.

5.8 Provincia di Ravenna

Nella provincia di Ravenna si riscontra una situazione complessivamente stazionaria rispetto il precedente periodo di monitoraggio e in leggero miglioramento rispetto al monitoraggio 2006-2011. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,54 mm/anno rispetto a -3,58 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.22 e 5.23). Le aree con velocità verticali positive (in sollevamento) sono prevalentemente ubicate a est di Faenza, mentre per il resto sono assenti o comunque arealmente poco significative. Sono presenti alcuni areali di ridotte dimensioni con valori di velocità di abbassamento che raggiungono al massimo 10 mm/anno in corrispondenza di Cotignola e ad ovest di Faenza. Anche lungo la costa (Fiumi Uniti e Lido di Dante) permangono valori significativi in abbassamento anche se risultano in miglioramento rispetto l'ultimo rilievo con valori attuali di circa 7,5 e massimi di 10 mm/anno.

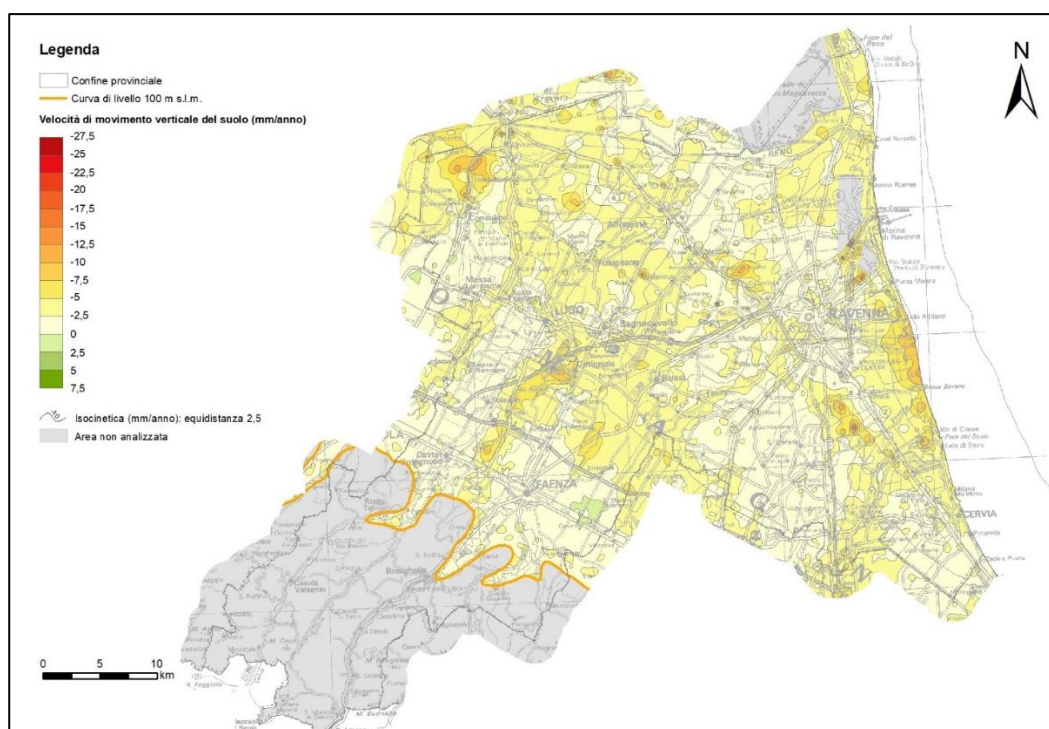


Figura 5.22: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Ravenna.

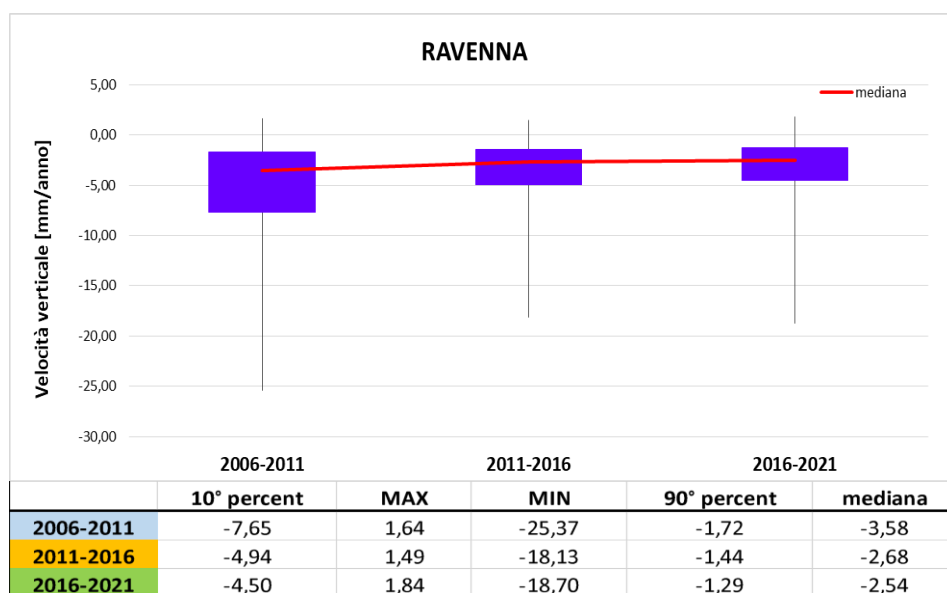


Figura 5.23: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Ravenna.

5.9 Provincia di Forlì-Cesena

Nella provincia di Forlì-Cesena si riscontra una situazione complessivamente simile a quella di Ravenna, ovvero stazionaria rispetto il precedente periodo di monitoraggio e in leggero miglioramento rispetto al monitoraggio 2006-2011. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,40 mm/anno rispetto a -4,42 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.24 e 5.25). Le aree con velocità verticali positive (in sollevamento) sono prevalentemente ubicate al confine con la Provincia di Ravenna a est di Faenza, mentre per il resto sono assenti o comunque arealmente poco significative. Permane un areale critico a est di Savignano sul Rubicone con velocità di oltre 15 mm/anno in aumento rispetto l'ultimo rilievo.

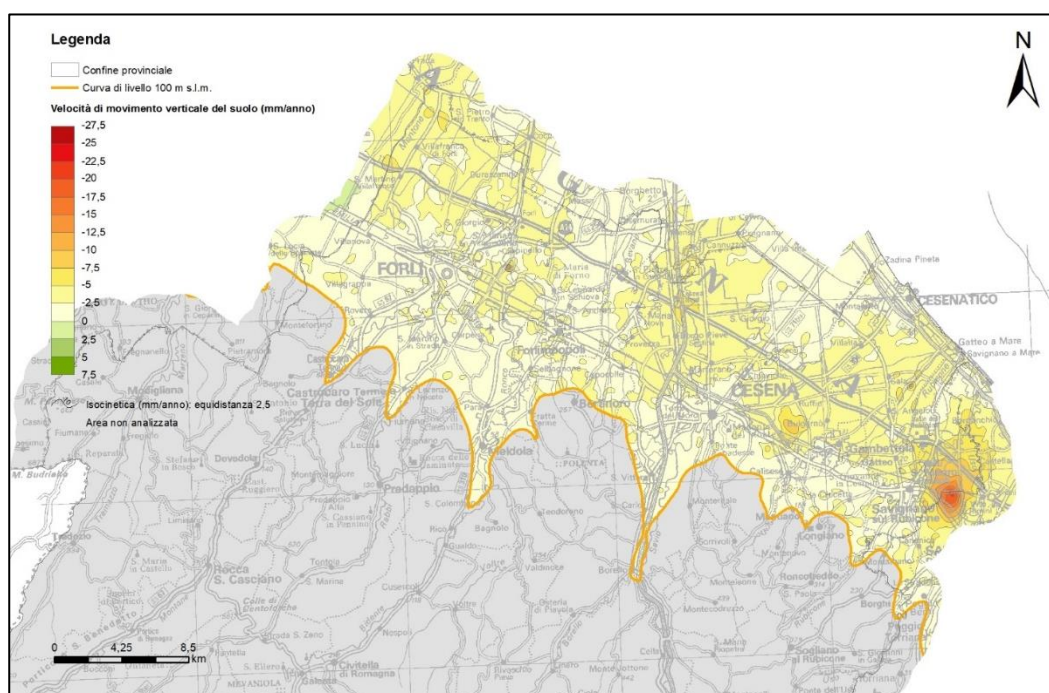


Figura 5.24: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Forlì-Cesena.

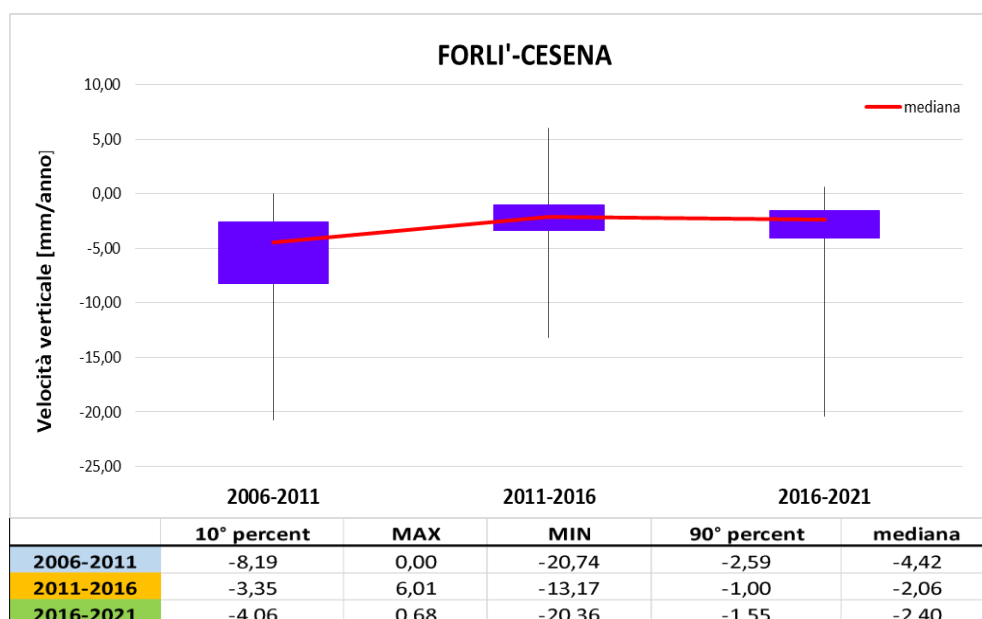


Figura 5.25: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Forlì-Cesena.

5.10 Provincia di Rimini

Anche nella provincia di Rimini, come per Forlì-Cesena, si riscontra una situazione complessivamente stazionaria nel tempo, seppure alcuni minimi molto localizzati nell'area critica di Savignano sul Rubicone, al confine nord di provincia, influisce sulla distribuzione dei dati dell'intera provincia. La mediana della distribuzione delle velocità verticali a scala provinciale è ora pari a -2,33 mm/anno rispetto a -3,03 mm/anno del periodo 2006-2011 (Figura 5.26 e 5.27). Anche in questo caso le aree con velocità verticali positive (in sollevamento) sono assenti o comunque arealmente poco significative. Permane come già detto l'areale critico al confine nord di provincia, a est di Savignano sul Rubicone.

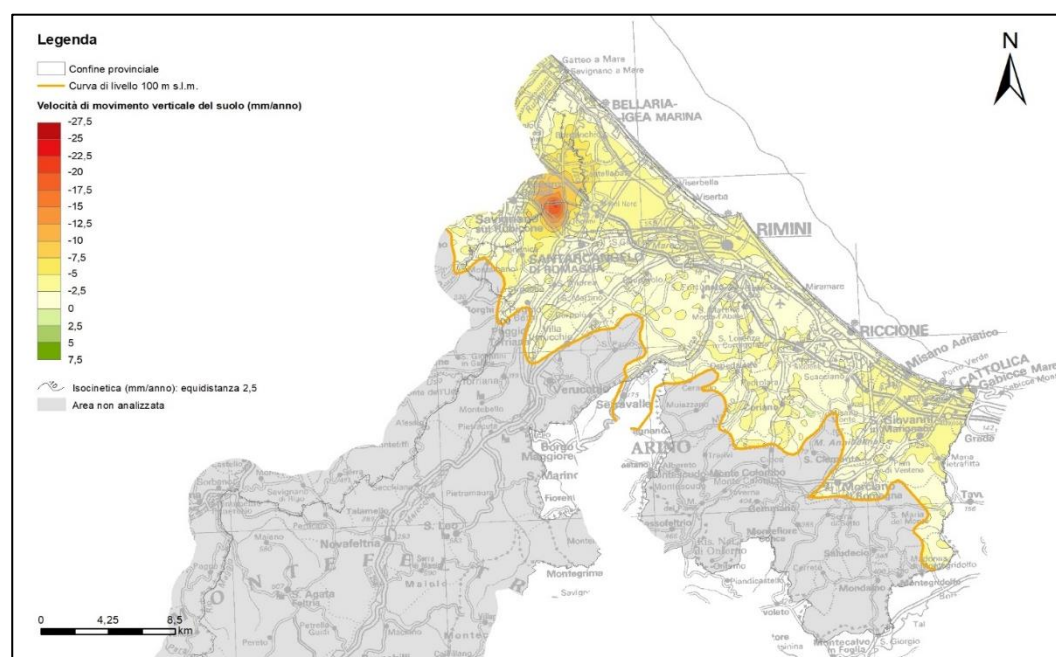


Figura 5.26: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 in provincia di Rimini.

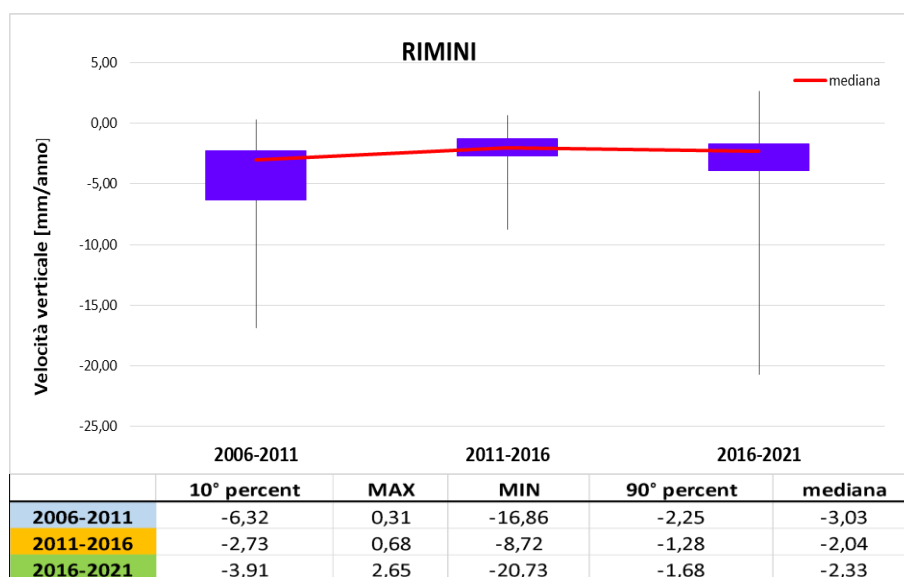


Figura 5.27: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 2006-2011 al 2016-2021 in provincia di Rimini.

5.11 Il litorale

Lungo il litorale dell'Emilia-Romagna non si evidenziano velocità verticali oltre i 10 mm/anno che si raggiungono nella zona della foce dei Fiumi Uniti tra Lido Adriano e Lido di Dante (Tabella 5.6 e Figura 5.28 e Allegato 4). Le velocità riscontrate nell'ultimo periodo risultano in attenuazione rispetto a quelle del periodo 2011-2016, in particolare da Ravenna verso sud, come risulta evidente dalla Tabella 5.6, dove le velocità di Lido di Dante si sono circa dimezzate.

Nella Tabella 5.6 sono riportate le velocità di abbassamento di ciascun periodo di monitoraggio dal 1999 al 2021 e il calcolo dell'abbassamento totale nel periodo per diverse località costiere dalla foce del Po di Goro a Cattolica. Le località che hanno registrato i valori maggiori di abbassamento sono Lido di Dante, Lido Adriano e Foce del Bevano.

Tabella 5.6: Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 1999 al 2021 lungo il litorale.

Località	Velocità di abbassamento (mm/anno)				Abbassamento totale 1999-2021 (cm)
	1999-2005	2006-2011	2011-2016	2016-2021	
Foce del Po di Goro	9	9	4	6	-15
Goro	10	8	3	5	-14
Boscone della Mesola	7	5	3	6	-11
Lido delle Nazioni	10	2	3	5	-11
Porto Garibaldi	8	3	2	4	-9
Dosso degli Angeli	13	2	3	4	-12
Casalborsetti	10	3	2	4	-11
Porto Corsini	13	7	8	6	-18
Marina di Ravenna	8	5	4	4	-11
Punta Marina	10	5	4	4	-12
Lido Adriano	15	14	11	8	-25
Lido di Dante	19	21	17	9	-35
Foce Bevano	11	11	11	7	-22
Lido di Savio	10	6	5	5	-14
Milano Marittima	10	7	5	6	-15
Pinarella di Cervia	8	5	3	3	-10
Cesenatico	9	5	3	3	-11
Gatteo a Mare	10	6	3	3	-12
Bellaria	8	5	2	2	-10
Torre Pedrera	6	3	3	3	-8
Rimini	9	6	4	3	-12
Cattolica	4	4	3	3	-7

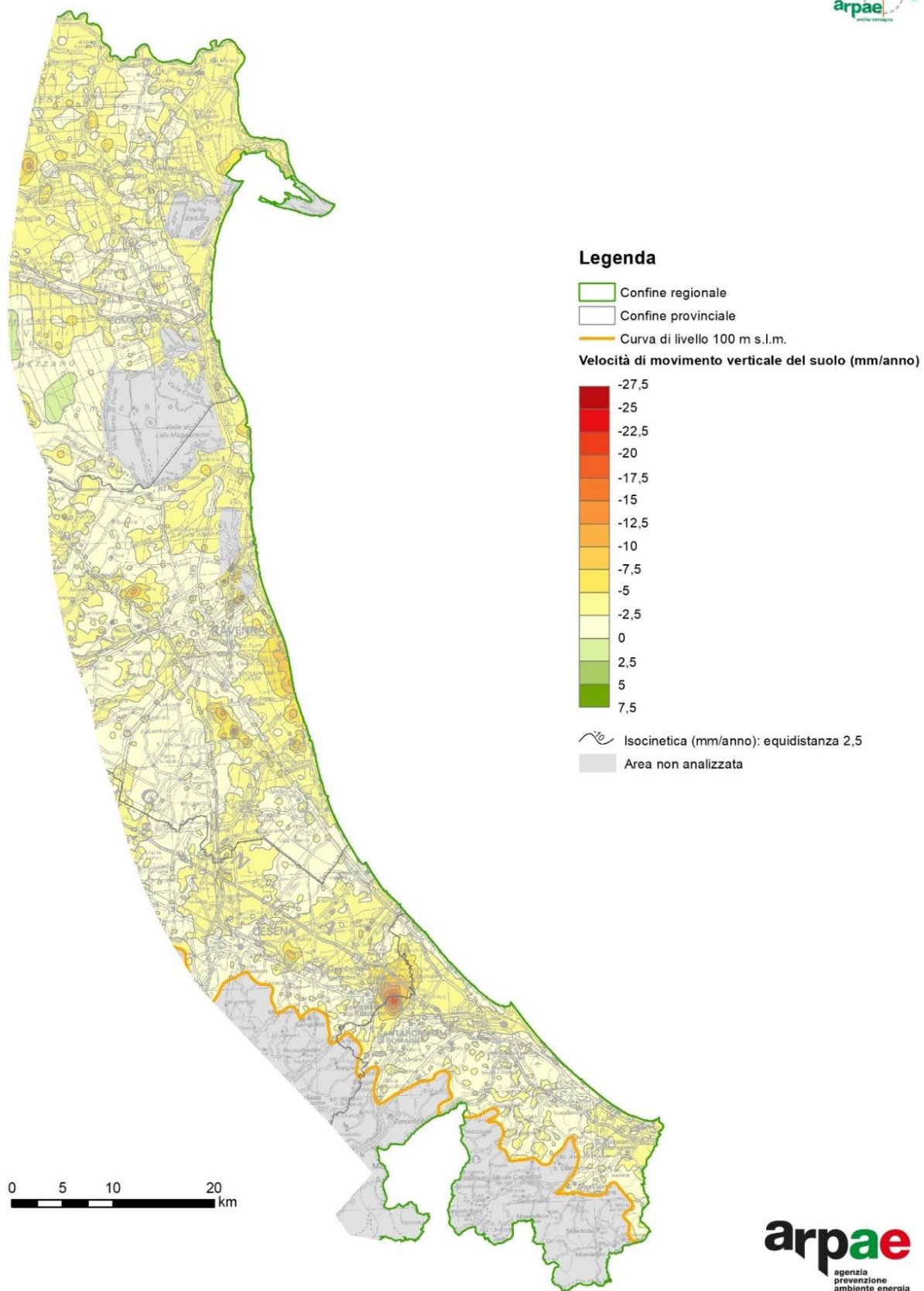


Figura 5.28: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021 lungo il litorale (Allegato 4).

5.12 Evoluzione dei movimenti verticali del suolo nei Comuni della pianura emiliano-romagnola dal 2006 al 2021.

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo nella Pianura dell'Emilia-Romagna attraverso misure interferometriche satellitari ad alta precisione, effettuati a partire dal 2005 sino ad oggi, ha consentito di osservare l'andamento dei dati di subsidenza nel tempo.

Nella Tabella 5.7 sono riportate le velocità medie, minime e massime di movimento verticale del suolo per i periodi di monitoraggio 2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021 nei Comuni della pianura dell'Emilia-Romagna, secondo l'ordine alfabetico per ciascuna provincia. I dati così suddivisi sono stati elaborati considerando esclusivamente i Comuni ubicati a valle della isolinea dei 100m, individuata come limite tra il territorio montano e quello di pianura nella cartografia di subsidenza, e aventi una percentuale di territorio in Pianura maggiore del 5%.

Per poter rendere i dati interferometrici confrontabili nel tempo, si è reso necessario sovrapporre i grigliati 100x100 m elaborati nei tre periodi di monitoraggio (2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021) al fine di escludere eventuali punti di misura non compresi nelle analisi satellitari di ciascun quinquennio a causa della modifica dei confini amministrativi provinciali o regionali, con i medesimi criteri già indicati all'inizio del capitolo 5.

Tabella 5.7: Velocità medie dei movimenti verticali del suolo per Comune dal 2006 al 2021.

Prov.	Comune	% Superficie in Pianura	2006-2011 (mm/anno)			2011-2016 (mm/anno)			2016-2021 (mm/anno)		
			Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
BO	ANZOLA DELL'EMILIA	100	-18,15	-34,85	0,00	-4,19	-11,15	2,18	-11,65	-24,71	-2,29
BO	ARGELATO	100	-23,29	-32,80	-16,63	-5,85	-12,64	-1,20	-14,19	-19,78	-9,03
BO	BARICELLA	100	-2,41	-5,27	-0,62	-2,68	-5,45	0,36	-2,24	-6,51	0,49
BO	BENTIVOGLIO	100	-7,52	-22,86	-1,06	-2,86	-10,92	0,80	-4,89	-21,90	-0,17
BO	BOLOGNA	74	-10,07	-25,73	1,50	-2,21	-6,92	4,55	-7,13	-21,49	0,89
BO	BUDRIO	100	-4,42	-24,37	0,04	-3,41	-18,80	0,38	-3,18	-17,49	4,92
BO	CALDERARA DI RENO	100	-21,57	-32,85	-10,11	0,06	-9,71	3,56	-15,91	-21,15	-7,60
BO	CASALECCHIO DI RENO	49	-0,23	-1,40	0,34	-2,79	-4,04	0,00	-1,03	-3,02	0,98
BO	CASTEL GUELFO DI BOLOGNA	100	-3,78	-11,03	-1,48	-2,19	-5,05	-0,90	-2,21	-5,41	-0,23
BO	CASTEL MAGGIORE	100	-19,95	-28,33	-14,25	-1,31	-7,15	3,19	-14,71	-22,98	-9,04
BO	CASTEL SAN PIETRO TERME	49	-3,46	-24,28	0,00	-1,72	-6,31	4,69	-2,11	-7,05	1,35
BO	CASTELLO D'ARGILE	100	-17,40	-31,09	-9,28	-8,84	-16,11	-2,87	-10,34	-17,95	-5,38
BO	CASTENASO	100	-3,95	-8,37	0,03	-2,14	-5,64	0,45	-2,65	-6,25	0,24
BO	CREVALCORE	100	-4,17	-9,65	0,00	-2,00	-5,94	0,99	-2,68	-15,73	2,68
BO	DOZZA	63	-2,75	-6,58	0,00	-1,43	-4,91	0,00	-2,10	-7,55	0,10
BO	GALLIERA	100	-2,67	-5,72	-0,98	-2,44	-5,10	1,08	-2,10	-6,81	0,41
BO	GRANAROLO DELL'EMILIA	100	-8,40	-18,65	-1,20	-3,36	-6,89	0,68	-5,04	-12,09	-0,13
BO	IMOLA	81	-4,92	-16,67	0,13	-3,08	-11,94	0,48	-2,62	-14,54	0,58
BO	MALALBERGO	100	-2,56	-7,13	-0,03	-2,02	-5,28	-0,34	-2,13	-9,17	0,46
BO	MEDICINA	100	-3,74	-9,70	0,00	-2,88	-7,00	0,10	-2,42	-8,72	0,44
BO	MINERBIO	100	-3,49	-10,38	-0,39	-2,67	-7,57	0,12	-2,45	-7,08	0,15
BO	MOLINELLA	100	-4,05	-11,33	0,00	-4,10	-8,66	-1,57	-3,76	-10,38	3,41
BO	MORDANO	100	-6,14	-8,99	0,00	-2,32	-5,53	-0,11	-2,21	-6,86	0,88

			2006-2011 (mm/anno)			2011-2016 (mm/anno)			2016-2021 (mm/anno)		
Prov.	Comune	% Superficie in Pianura	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
BO	OZZANO DELL'EMILIA	53	-1,99	-6,61	0,93	-0,69	-4,89	2,58	-2,78	-5,71	2,45
BO	PIEVE DI CENTO	100	-7,20	-15,05	-2,24	-4,27	-9,09	-1,59	-4,48	-10,36	-0,62
BO	SALA BOLOGNESE	100	-27,99	-35,05	0,00	-6,24	-13,35	1,85	-17,05	-22,36	-11,17
BO	SAN GIORGIO DI PIANO	100	-12,11	-22,13	-3,67	-4,14	-8,90	-1,72	-7,28	-14,06	-2,41
BO	SAN GIOVANNI IN PERSICETO	100	-10,44	-34,48	0,00	-4,18	-11,21	0,84	-7,01	-21,58	-0,04
BO	SAN LAZZARO DI SAVENA	63	-0,33	-3,17	1,46	-0,95	-4,48	1,96	-1,57	-6,32	0,67
BO	SAN PIETRO IN CASALE	100	-3,29	-10,93	-0,37	-1,19	-5,77	1,10	-2,13	-7,86	0,34
BO	SANT'AGATA BOLOGNESE	100	-2,41	-8,51	0,00	-1,83	-5,01	0,11	-1,59	-13,27	0,76
BO	VALSAMOGGIA	27	-1,01	-12,66	1,44	-0,75	-4,90	0,95	-2,49	-11,77	1,19
BO	ZOLA PREDOSA	68	-8,42	-24,30	0,45	-0,90	-4,66	3,16	-6,47	-17,85	1,36
FC	BERTINORO	60	-3,87	-7,57	0,00	-1,89	-4,97	0,00	-2,42	-8,80	-0,77
FC	CASTROCARO TERME E TERRA DEL SOLE	12	-1,58	-2,60	0,00	-2,30	-3,24	0,00	-1,68	-4,09	0,06
FC	CESENA	67	-5,33	-12,67	0,00	-1,95	-6,76	1,04	-2,82	-10,58	-0,28
FC	CESENATICO	100	-5,90	-10,06	0,00	-2,48	-7,90	-0,70	-2,91	-12,47	-0,45
FC	FORLI'	93	-4,56	-20,16	0,00	-2,31	-13,17	1,15	-2,40	-16,83	0,14
FC	FORLIMPOPOLI	100	-3,09	-5,31	-2,01	-1,89	-3,42	-0,58	-2,15	-4,09	-0,24
FC	GAMBETTOLA	100	-7,00	-10,45	-2,43	-2,92	-4,91	-0,81	-3,12	-7,63	-0,87
FC	GATTEO	100	-7,78	-12,97	-2,97	-2,23	-5,55	6,01	-3,65	-11,17	-1,23
FC	LONGIANO	75	-3,27	-7,52	0,00	-1,90	-3,77	0,00	-2,20	-6,56	-0,15
FC	MELDOLA	14	-2,90	-3,78	0,00	-1,81	-3,07	0,00	-1,80	-5,57	0,68
FC	MONTIANO	29	-3,13	-3,75	0,00	-2,01	-2,78	0,00	-2,10	-3,68	-0,84
FC	SAN MAURO PASCOLI	100	-11,00	-17,05	0,00	-3,84	-12,76	0,09	-6,22	-20,73	-1,49
FC	SAVIGNANO SUL RUBICONE	100	-5,85	-16,78	0,00	-2,35	-10,18	-0,02	-3,41	-15,68	-0,67
FE	ARGENTA	100	-1,63	-13,12	2,09	-2,67	-8,74	-0,20	-2,87	-13,81	1,82
FE	BONDENO	100	-0,72	-2,32	0,36	-2,09	-4,86	1,15	-2,40	-6,73	1,64
FE	CENTO	100	-2,66	-12,20	0,00	-2,21	-7,46	0,02	-2,30	-8,46	0,42
FE	CODIGORO	100	-2,44	-5,96	-0,39	-2,50	-6,92	-0,75	-3,11	-12,84	0,89
FE	COMACCHIO	100	-1,18	-8,44	1,35	-2,27	-5,38	0,00	-2,25	-9,21	1,57
FE	COPPARO	100	-2,23	-5,01	-0,81	-2,31	-4,22	-0,99	-3,05	-7,61	-0,63
FE	FERRARA	100	-1,76	-4,72	0,35	-2,01	-5,98	-0,37	-2,75	-8,84	-0,39
FE	FISCAGLIA	100	-1,36	-3,97	0,59	-2,19	-6,18	-0,54	-3,10	-10,72	-0,22
FE	GORO	100	-5,43	-9,92	0,00	-3,14	-5,26	0,00	-4,44	-8,58	-2,40
FE	JOLANDA DI SAVOIA	100	-2,92	-5,56	-0,46	-2,71	-6,34	-1,05	-3,86	-14,23	-0,79
FE	LAGOSANTO	100	-1,21	-3,32	0,68	-2,14	-3,81	-1,19	-2,47	-5,25	-0,61
FE	MASI TORELLO	100	-1,04	-2,52	-0,29	-1,68	-2,99	-0,83	-2,88	-6,02	-1,13
FE	MESOLA	100	-3,55	-5,70	0,00	-2,66	-4,08	0,00	-3,10	-7,29	0,60
FE	OSTELLATO	100	-1,30	-8,76	2,39	-2,70	-6,59	-0,31	-2,80	-9,13	1,23
FE	POGGIO RENATICO	100	-2,05	-5,05	0,00	-2,99	-6,08	-0,86	-2,66	-6,78	1,37
FE	PORTOMAGGIORE	100	-0,85	-6,64	2,17	-2,03	-3,87	-0,77	-2,51	-8,41	-0,02

Prov.	Comune	% Superficie in Pianura	2006-2011 (mm/anno)			2011-2016 (mm/anno)			2016-2021 (mm/anno)		
			Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
FE	RIVA DEL PO	100	-3,04	-6,56	0,00	-2,42	-4,73	-1,14	-3,56	-10,76	-1,44
FE	TERRE DEL RENO	100	-1,47	-4,16	0,05	-4,30	-9,02	-0,88	-3,49	-12,51	-0,33
FE	TRESIGNANA	100	-1,51	-3,76	-0,34	-2,20	-4,19	-0,91	-2,81	-9,76	0,20
FE	VIGARANO MAINARDA	100	-0,99	-2,94	0,09	-2,34	-5,48	-0,63	-2,82	-5,92	-0,68
FE	VOGHIERA	100	-0,94	-2,26	-0,03	-1,64	-3,41	-0,53	-2,42	-7,92	-0,09
MO	BASTIGLIA	100	-7,81	-11,23	-5,28	-4,88	-8,23	-2,87	-4,88	-7,94	-1,86
MO	BOMPORTO	100	-5,85	-18,87	-0,59	-4,64	-17,33	-0,95	-4,42	-17,87	0,17
MO	CAMPOGALLIANO	100	-4,22	-11,92	-1,24	-1,11	-10,40	0,37	-1,23	-9,95	0,45
MO	CAMPOSANTO	100	-1,39	-4,80	0,18	-1,95	-5,76	0,88	-1,49	-6,93	0,50
MO	CARPI	100	-5,01	-23,46	1,30	-3,81	-23,37	0,18	-4,54	-27,29	0,58
MO	CASTELFRANCO EMILIA	100	-1,16	-7,43	1,92	-1,04	-4,11	0,79	-1,88	-8,48	1,31
MO	CASTELNUOVO RANGONE	100	-1,51	-7,04	1,30	-1,36	-4,90	0,72	-2,31	-7,07	-0,55
MO	CASTELVETRO DI MODENA	16	-1,24	-2,71	0,47	-0,90	-2,65	0,69	-1,83	-4,39	-0,44
MO	CAVEZZO	100	-1,38	-4,18	-0,25	-2,50	-7,13	0,02	-2,13	-6,04	-0,14
MO	CONCORDIA SULLA SECCHIA	100	-0,52	-1,30	0,37	-2,19	-3,75	-0,30	-2,49	-5,68	-0,35
MO	FINALE EMILIA	100	-0,68	-2,48	0,58	-1,57	-6,53	2,19	-1,84	-8,63	1,08
MO	FORMIGINE	96	-1,02	-3,20	0,57	-0,54	-2,35	0,89	-1,86	-4,84	1,44
MO	MEDOLLA	100	-0,51	-3,67	0,60	-1,40	-6,20	2,57	-2,53	-13,97	-0,13
MO	MIRANDOLA	100	-0,56	-1,76	0,51	-1,73	-4,80	1,61	-2,43	-6,74	1,17
MO	MODENA	100	-3,63	-14,56	0,60	-2,26	-12,74	1,63	-2,40	-17,60	3,20
MO	NONANTOLA	100	-4,50	-11,65	-1,27	-2,80	-7,97	-0,22	-2,64	-8,41	0,64
MO	NOVI DI MODENA	100	-0,48	-5,04	0,44	-1,56	-3,98	0,02	-1,66	-5,75	0,34
MO	RAVARINO	100	-6,94	-13,75	-2,76	-3,93	-13,75	-1,65	-4,38	-17,75	-1,28
MO	SAN CESARIO SUL PANARO	100	-0,32	-4,42	1,39	-0,61	-4,66	1,97	-1,86	-5,90	0,79
MO	SAN FELICE SUL PANARO	100	-0,30	-2,50	0,66	-1,33	-3,90	1,38	-1,33	-4,82	0,60
MO	SAN POSSIDONIO	100	-0,82	-2,20	0,11	-1,48	-3,67	-0,04	-1,97	-4,82	0,26
MO	SAN PROSPERO	100	-3,28	-9,60	-1,05	-3,05	-9,37	-1,43	-2,99	-11,63	-0,52
MO	SASSUOLO	20	0,12	-1,62	1,87	-0,58	-1,69	0,76	-1,61	-4,31	-0,21
MO	SAVIGNANO SUL PANARO	25	-1,53	-3,52	0,00	-1,16	-3,07	0,16	-2,27	-4,74	-0,42
MO	SOLIERA	100	-7,24	-32,80	-2,72	-4,15	-25,24	-0,78	-3,89	-14,90	0,11
MO	SPILAMBERTO	96	-2,67	-5,19	0,19	-2,45	-5,24	0,62	-3,29	-6,53	-0,54
MO	VIGNOLA	16	-1,22	-2,18	0,00	-1,32	-2,32	0,00	-1,41	-3,00	-0,14
PC	ALSENO	53	0,5	-3,7	1,5	0,2	-3,0	1,7	-1,5	-4,6	1,3
PC	BESENZONE	100	1,8	-0,5	3,1	0,6	-1,4	1,6	-1,7	-8,9	0,7
PC	BORGONOVO VAL TIDONE	37	3,0	0,0	4,4	0,5	-0,5	1,6	-2,0	-5,7	0,9
PC	CADEO	100	0,7	-2,1	2,5	-0,3	-6,1	1,8	-3,0	-16,2	1,2
PC	CALENDASCO	100	1,0	-0,8	2,3	0,2	-1,0	1,5	-1,7	-5,5	0,2
PC	CAORSO	100	1,1	-0,2	2,2	0,3	-1,3	1,7	-1,3	-3,7	2,5
PC	CARPANETO PIACENTINO	28	0,8	-0,7	1,9	-0,4	-3,7	0,9	-4,0	-12,3	-0,5

Prov.	Comune	% Superficie in Pianura	2006-2011 (mm/anno)			2011-2016 (mm/anno)			2016-2021 (mm/anno)		
			Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
PC	CASTEL SAN GIOVANNI	74	1,6	0,0	3,1	0,5	-1,1	2,0	-1,7	-8,5	1,9
PC	CASTELVETRO PIACENTINO	100	0,8	-0,5	3,1	-0,3	-1,4	1,0	-2,0	-5,0	5,2
PC	CORTEMAGGIORE	100	1,9	-0,6	3,2	0,5	-2,4	2,0	-1,3	-8,9	1,2
PC	FIORENZUOLA D'ARDA	96	0,7	-2,7	2,2	0,0	-4,1	1,6	-2,2	-15,0	0,0
PC	GAZZOLA	6	1,9	0,0	3,2	0,8	-0,4	1,3	-1,2	-1,9	0,4
PC	GOSSOLENGO	77	1,9	0,0	3,4	0,7	-1,4	2,1	-1,1	-3,3	2,4
PC	GRAGNANO TREBBIENSE	95	2,7	0,0	4,2	1,0	-0,7	2,1	-1,8	-9,7	1,9
PC	MONTICELLI D'ONGINA	100	1,0	-0,5	4,1	-0,2	-1,1	1,0	-2,1	-7,7	0,1
PC	PIACENZA	100	1,2	-0,9	3,8	0,4	-1,7	2,1	-1,5	-6,1	1,1
PC	PODENZANO	59	2,3	0,0	4,2	0,3	-1,5	1,8	-1,2	-7,2	0,5
PC	PONTENURE	100	2,0	-0,2	4,2	0,3	-1,8	2,1	-1,6	-6,8	0,3
PC	ROTOFRENO	100	1,6	-0,4	3,6	0,6	-0,8	2,1	-1,6	-5,2	0,5
PC	SAN GIORGIO PIACENTINO	28	2,7	0,0	3,8	0,8	-0,5	1,9	-1,1	-3,0	0,9
PC	SAN PIETRO IN CERRO	100	1,4	0,3	2,4	0,3	-1,0	1,7	-1,4	-7,0	0,5
PC	SARMATO	100	1,9	0,2	4,0	0,7	-1,0	2,5	-1,8	-5,1	1,3
PC	VILLANOVA SULL'ARDA	100	0,2	-4,6	1,7	0,0	-0,9	0,8	-1,8	-3,5	0,3
PR	BUSSETO	100	1,01	-3,75	2,36	0,05	-3,66	1,62	-1,86	-4,95	0,99
PR	COLLECCHIO	40	0,73	-0,50	2,89	-0,07	-2,07	0,97	-1,27	-3,35	0,19
PR	COLORNO	100	-1,17	-4,73	0,96	0,40	-3,77	2,50	-2,36	-10,26	0,24
PR	FIDENZA	72	0,76	-0,98	2,66	0,16	-3,70	1,65	-1,77	-8,47	2,37
PR	FONTANELLATO	100	1,32	-0,54	2,87	0,16	-2,23	1,38	-1,74	-5,81	0,33
PR	FONTEVIVO	100	0,47	-0,64	1,75	-0,29	-2,59	0,92	-1,78	-8,28	-0,41
PR	MONTECHIARUGOLO	31	0,85	-0,80	2,23	0,31	-0,87	1,59	-0,80	-3,37	0,70
PR	NOCETO	58	0,77	-0,66	3,19	-0,14	-2,22	1,40	-1,57	-5,42	0,73
PR	PARMA	83	0,12	-4,54	1,92	-0,13	-11,16	6,63	-1,64	-14,68	0,94
PR	POLESINE ZIBELLO	100	0,19	-2,95	1,82	-0,15	-1,53	0,93	-1,90	-5,29	0,41
PR	ROCCABIANCA	100	-0,43	-3,51	1,38	-0,55	-1,41	0,56	-2,33	-4,97	-0,56
PR	SAN SECONDO PARMENSE	100	-0,43	-1,92	1,16	-0,22	-4,43	1,79	-2,78	-8,59	-0,35
PR	SISSA TRECASALI	100	-0,08	-2,72	1,26	-0,08	-5,83	3,53	-2,33	-12,91	-0,25
PR	SORAGNA	100	1,18	-0,75	3,16	-0,11	-4,47	1,39	-2,56	-5,71	-0,93
PR	SORBOLO MEZZANI	100	-1,52	-3,47	0,00	0,20	-4,23	2,89	-2,24	-8,67	-0,55
PR	TORRILE	100	-0,19	-3,45	0,88	0,35	-3,66	3,09	-1,93	-7,49	0,15
RA	ALFONSINE	100	-2,74	-11,01	0,08	-2,99	-8,43	-1,14	-2,92	-11,01	0,28
RA	BAGNACAVALLO	100	-4,00	-7,02	-1,93	-2,96	-8,25	-0,74	-3,13	-13,23	-1,07
RA	BAGNARA DI ROMAGNA	100	-4,62	-9,10	-1,78	-1,66	-4,11	-0,04	-2,01	-4,09	-0,12
RA	BRISIGHELLA	6	-1,74	-2,84	0,00	-1,57	-2,60	0,00	-1,94	-3,47	-0,26
RA	CASTEL BOLOGNESE	89	-4,53	-16,85	0,00	-1,71	-4,56	1,34	-1,66	-10,15	0,23
RA	CERVIA	100	-4,16	-9,90	0,00	-2,36	-9,39	-0,56	-2,45	-8,82	0,00
RA	CONSELICE	100	-5,84	-16,09	-1,77	-4,21	-14,21	-0,12	-3,86	-13,42	0,83
RA	COTIGNOLA	100	-7,98	-16,52	-2,11	-3,38	-7,96	-0,54	-4,42	-9,23	-0,85

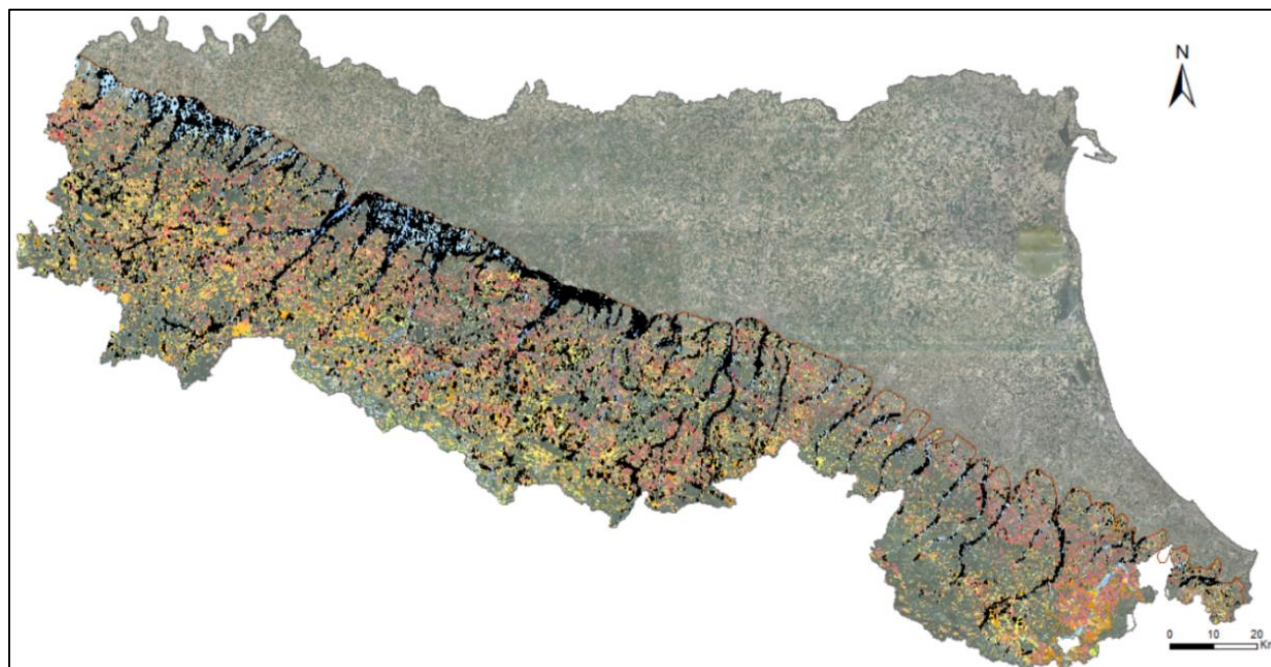
Prov.	Comune	% Superficie in Pianura	2006-2011 (mm/anno)			2011-2016 (mm/anno)			2016-2021 (mm/anno)		
			Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
RA	FAENZA	93	-7,04	-25,37	0,00	-3,36	-14,87	0,62	-2,45	-10,54	1,84
RA	FUSIGNANO	100	-3,21	-5,92	-1,58	-3,63	-7,17	-2,28	-3,01	-9,45	-1,36
RA	LUGO	100	-4,42	-11,21	-1,64	-3,50	-9,37	-0,05	-2,99	-10,02	0,20
RA	MASSA LOMBARDA	100	-3,67	-7,93	0,00	-2,60	-5,67	-0,14	-1,89	-5,69	1,15
RA	RAVENNA	100	-3,74	-20,66	1,64	-3,20	-18,13	0,00	-2,81	-18,70	1,33
RA	RIOLO TERME	11	-1,23	-2,25	0,00	-1,71	-3,43	0,00	-2,20	-3,22	-0,55
RA	RUSSI	100	-4,52	-9,12	0,00	-2,32	-7,28	-0,86	-2,85	-8,88	0,27
RA	SANT'AGATA SUL SANTERNO	100	-4,78	-6,98	-2,81	-3,84	-5,87	-1,69	-2,68	-5,96	-0,81
RA	SOLAROLO	100	-7,03	-16,32	0,00	-1,69	-7,05	1,49	-2,17	-8,82	0,67
RN	BELLARIA-IGEA MARINA	100	-6,50	-11,94	0,00	-2,55	-4,93	0,00	-3,34	-6,98	0,73
RN	CATTOLICA	100	-2,11	-3,28	-0,48	-1,95	-3,21	-0,47	-3,12	-5,36	-1,85
RN	CORIANO	69	-2,94	-4,91	0,00	-2,07	-2,97	0,00	-2,26	-8,05	1,35
RN	MISANO ADRIATICO	95	-2,48	-3,65	0,31	-2,06	-3,27	0,17	-2,64	-7,18	0,53
RN	MONTEGRIDOLFO	49	-3,85	-4,65	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,26	-4,54	0,63
RN	MONTESCUDO - MONTE COLOMBO	8	-2,74	-4,65	0,00	-1,78	-2,48	0,00	-2,67	-4,71	-1,35
RN	MORCIANO DI ROMAGNA	83	-2,95	-3,64	0,00	-2,09	-2,88	0,00	-2,05	-4,13	-1,06
RN	POGGIO TORRIANA	28	-3,38	-4,65	0,00	-1,97	-2,54	0,00	-2,22	-6,04	-0,67
RN	RICCIONE	100	-2,69	-3,37	-1,92	-2,22	-3,26	-1,32	-2,19	-5,02	0,17
RN	RIMINI	92	-4,01	-13,97	0,00	-1,91	-6,96	0,68	-2,67	-7,87	1,11
RN	SALUDECIO	24	-3,09	-4,19	0,00	-1,86	-3,37	0,00	-1,95	-6,22	2,65
RN	SAN CLEMENTE	46	-2,95	-3,87	0,00	-2,06	-2,68	0,00	-2,09	-3,66	0,87
RN	SAN GIOVANNI IN MARIGNANO	100	-2,98	-3,83	0,00	-2,19	-3,08	0,00	-2,70	-6,15	0,69
RN	SANTARCANGELO DI ROMAGNA	92	-4,40	-16,86	0,00	-2,35	-8,72	0,00	-3,29	-20,42	0,33
RN	VERUCCHIO	23	-2,92	-4,61	0,00	-1,92	-2,43	0,00	-2,07	-3,82	-0,83

5.13 La zona collinare e montana

Il monitoraggio condotto per l'aggiornamento dei movimenti verticali del suolo 2016-2021 ha consentito di acquisire i dati interferometrici dell'intero territorio regionale, inclusa la zona collinare e montana che nei precedenti rilievi non era mai stata indagata. Per tale ragione in questa porzione di territorio non è possibile fornire una valutazione delle tendenze, se non quelle in atto, considerando che il contesto geomorfologico è completamente diverso rispetto il territorio di pianura. Le velocità dei punti di misura, sia verticali sia orizzontali est-ovest, dipendono prevalentemente dal dissesto idrogeologico molto presente nella zona collinare e montana.

I dati interferometrici ottenuti nell'ambito di questo lavoro possono essere di supporto a valutazioni ulteriori e aggiuntive sulla distribuzione spaziale dei fenomeni naturali di movimento gravitativo o tettonico del suolo, cui l'intera fascia appenninica è soggetta. La quantità di punti di misura dell'area appenninica presenti nel dataset calibrato (si ricorda che ogni punto è rappresentativo di una maglia di lato 50x50 m) è di circa 1/3 rispetto i punti di misura presenti in area di Pianura (rispettivamente 152.755 MP a fronte dei 523.815 MP), dove abbiamo visto, nei paragrafi precedenti, che i riflettori risultano essere meglio distribuiti e pertanto l'informazione che ne deriva è più dettagliata in termini

di copertura areale. Per disporre di una prima rappresentazione dei dati nella porzione collinare e montana sono stati sovrapposti i valori di velocità verticale sulla cartografia della Regione Emilia-Romagna (2006), relativa all’Inventario dei Fenomeni franosi (Figura 5.29) considerando i punti di misura a quota maggiore della isolinea dei 100 m s.l.m.. Complessivamente 97.622 MP ricadono all’interno di un’area cartografata e individuata con una tipologia di fenomeno, e in Tabella 5.8 si riporta una sintesi per tipologia di fenomeno franoso e per provincia.



Legenda

a0 - Deposito di frana naturalmente stabilizzata o relitta di tipo indeterminato	a2d - Deposito di frana quiescente per colamento di fango	b1 - Deposito alluvionale in evoluzione
a1 - Deposito di frana attiva di tipo indeterminato	a2e - Deposito di frana quiescente per colamento detritico	bn - Deposito alluvionale attualmente non in evoluzione
a1a - Deposito di frana attiva per crollo e/o ribaltamento	a2g - Deposito di frana quiescente complessa	c3 - Deposito glaciale e periglaciale
a1b - Deposito di frana attiva per scivolamento	a2h - Deposito di frana quiescente per scivolamento in blocco o DGPV	d1 - Deposito eolico
a1d - Deposito di frana attiva per colamento di fango	a3 - Deposito di versante s.l.	e1 - Deposito di salsa
a1e - Deposito di frana attiva per colamento detritico	a4 - Deposito eluvio-colluviale	f1 - Deposito palustre
a1g - Deposito di frana attiva complessa	a5 - Antico deposito di versante	f2 - Deposito lacustre
a1h - Deposito di frana attiva per scivolamento in blocco o DGPV	a6 - Detrito di falda	h - Deposito antropico
a2 - Deposito di frana quiescente di tipo indeterminato	a8 - Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV)	h3 - Cava
a2b - Deposito di frana quiescente per scivolamento	a9 - Espansione laterale	

Figura 5.29: Sovrapposizione della cartografia dell’Inventario delle Frane della Regione Emilia-Romagna, a quota maggiore della isolinea dei 100 m s.l.m. e ubicazione dei punti (in nero) derivati dall’analisi interferometrica 2016-2021 che ricadono nella zona collinare e montana.

Tabella 5.8: Numero punti di misura (MP) in zona montana per tipologia di fenomeno franoso e per provincia

Tipologia fenomeno franoso	Numero di punti di misura in zona collinare e montana								
	PC	PR	RE	MO	BO	RA	FC	RN	Totale
a0 - Deposito di frana naturalmente stabilizzata o relitta di tipo indeterminato			1		3			14	18
a1 - Deposito di frana attiva di tipo indeterminato	18	4	5	8	5		7	7	54
a1a - Deposito di frana attiva per crollo e/o ribaltamento	11	3			16	13	8	4	55
a1b - Deposito di frana attiva per scivolamento	64	249	105	52	174	1	110	5	760
a1d - Deposito di frana attiva per colamento di fango	31	64	44	38	87		8	5	277
a1e - Deposito di frana attiva per colamento detritico	2			1	1				4
a1g - Deposito di frana attiva complessa	266	274	210	226	358		43	8	1385
a1h - Deposito di frana attiva per scivolamento in blocco o DGPV	259	45	45	79	66				494
a2 - Deposito di frana quiescente di tipo indeterminato	12	100	5	191	24	1	33	18	384
a2b - Deposito di frana quiescente per scivolamento	83	144	208	102	389	11	279	7	1223
a2d - Deposito di frana quiescente per colamento di fango	92	135	168	382	311	5	36	3	1132
a2e - Deposito di frana quiescente per colamento detritico		1			4				5
a2g - Deposito di frana quiescente complessa	2025	2157	1094	1413	2184	19	268	63	9223
a2h - Deposito di frana quiescente per scivolamento in blocco o DGPV	234	952	81	351	312		24		1954
a3 - Deposito di versante s.l.	997	1200	543	1867	1297	14	301	119	6338
a4 - Deposito eluvio-colluviale	171	344	513	370	590	41	155	4	2188
a6 - Detrito di falda	504	114	26	20	5	2	19		690
a8 - Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV)		23			5				28
a9 - Espansione laterale				81				37	118
b1 - Deposito alluvionale in evoluzione	483	727	187	108	447	6	174	12	2144
bn - Deposito alluvionale attualmente non in evoluzione	11754	15505	10945	12895	8280	1300	5034	1052	66765
c3 - Deposito glaciale e periglaciale	88	263	136	63					550
d1 - Deposito eolico	133	13	50	587	202				985
e1 - Deposito di salsa			9	42					51
f1 - Deposito palustre	7	9	5	270	7				298
f2 - Deposito lacustre							2		2
h - Deposito antropico	10	86	80	212	18		13		419
h3 - Cava	1	2	28	21	27		1		80
Totale punti ricadenti nelle zone dell'Inventario delle frane	17245	22414	14488	19379	14812	1413	6515	1358	97624
Punti esterni alle zone dell'Inventario delle frane	10515	10829	7687	8403	9773	433	4413	3078	55131
Totale complessivo	27760	33243	22175	27782	24585	1846	10928	4436	152755

6. Livelli delle falde, prelievi da acque sotterranee e precipitazioni nel periodo 2016-2021

Le velocità verticali del suolo, come accennato in premessa, dipendono anche dall'estrazione o velocità di ravvenamento di fluidi nel sottterraneo, e particolare importanza è determinata dal prelievo e ricarica delle acque sotterranee.

6.1 Variazione dei livelli di falda in Emilia-Romagna nel periodo 2016-2021

I livelli delle falde rappresentano la sommatoria degli effetti antropici e naturali sul sistema idrico sotterraneo in termini di prelievi di acque e ricarica naturale e/o artificiale delle falde medesime. L'andamento dei livelli di falda nel tempo permette, in prima approssimazione, di verificare lo stato di ricarica delle falde in funzione dei prelievi esistenti. Nelle Figure 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 sono riportati gli andamenti nel tempo delle soggiacenze (profondità dei livelli di falda dal piano campagna) per diverse tipologie di corpi idrici sotterranei di pianura dell'Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2021), dal 2002 al 2022. Si può osservare che nel periodo 2016-2021, coincidente con le elaborazioni interferometriche, i livelli di falda sono in diminuzione in modo generalizzato in tutte le tipologie di corpi idrici sotterranei, al contrario del periodo precedente, 2010-2011 e 2014-2016, i livelli di falda hanno subito un significativo incremento prevalentemente per effetto della consistente ricarica meteorica. Questo effetto è stato molto evidente nella conoide del Reno-Lavino a nord della città di Bologna, dove la soggiacenza è risalita in alcuni punti di circa 15 metri.

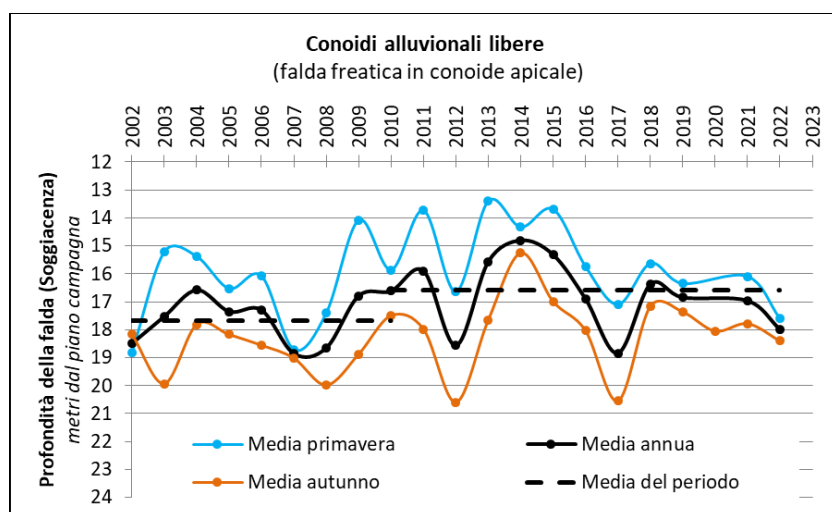


Figura 6.1: Evoluzione temporale delle falde nei corpi idrici di conoide alluvionale con acquiferi liberi (2002-2022)

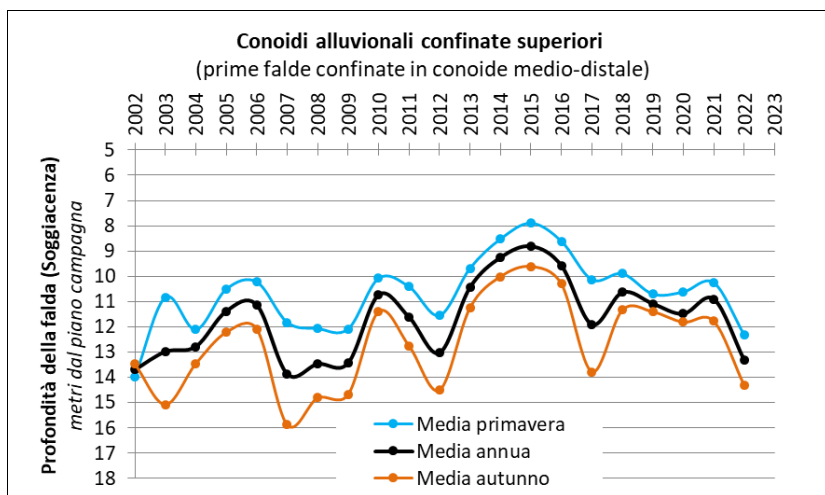


Figura 6.2: Evoluzione temporale delle falde nei corpi idrici di conoide alluvionale con acquiferi confinati superiori (2002-2022)

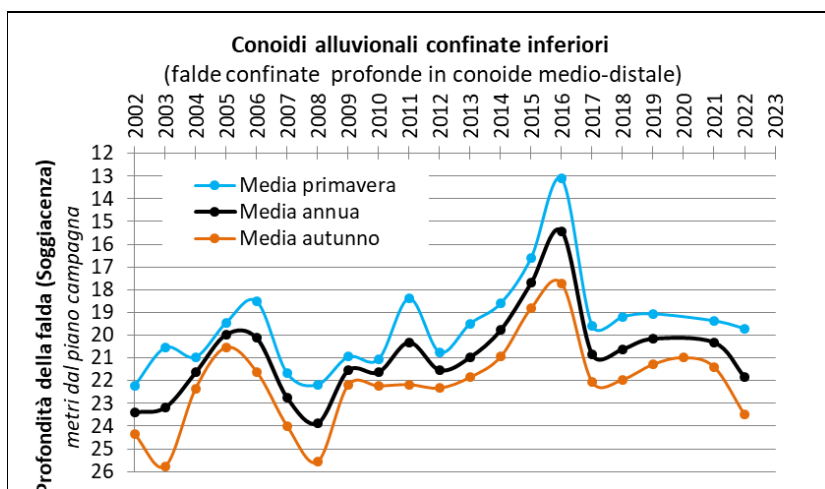


Figura 6.3: Evoluzione temporale delle falde nei corpi idrici di conoide alluvionale con acquiferi confinati inferiori (2002-2022)

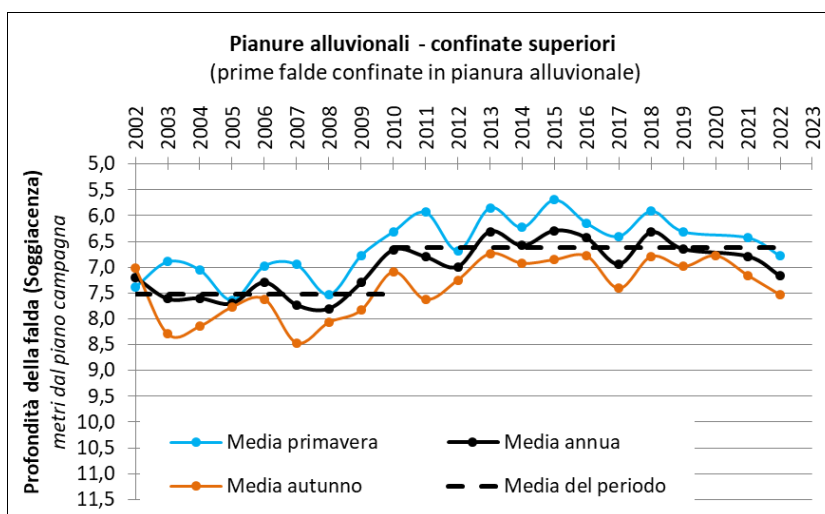


Figura 6.4: Evoluzione temporale delle falde nei corpi idrici di pianura alluvionale appenninica e padana confinate superiori (2002-2022)

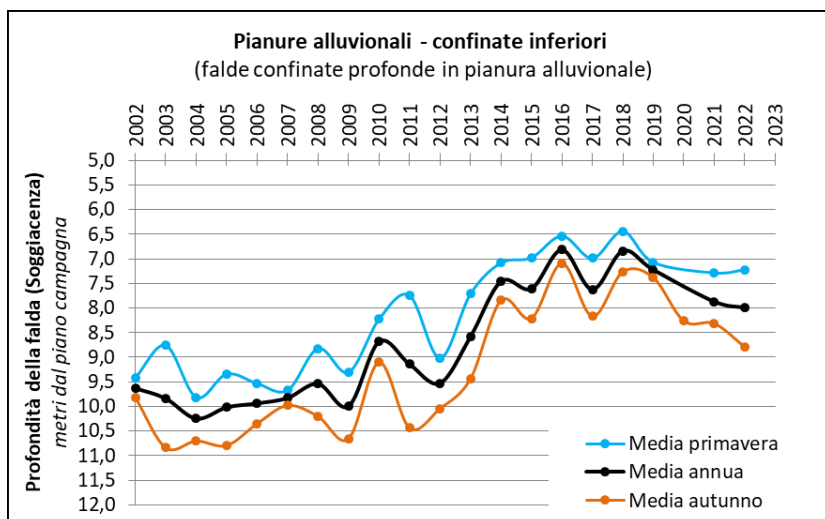


Figura 6.5: Evoluzione temporale delle falde nei corpi idrici di pianura alluvionale appenninica e padana confinate inferiori (2002-2022)

Attraverso la spazializzazione del dato di soggiacenza media 2016-2021 per tipologia di corpi idrici liberi e confinati superiori e per quelli liberi e confinati inferiori di pianura dell'Emilia-Romagna, è possibile osservare le zone del territorio che presentano i massimi approfondimenti della falda, che sono ubicati lungo il margine appenninico, in particolare nelle conoidi libere del Trebbia-Luretta, del Taro-Parola, negli acquiferi delle conoidi montane e sabbie gialle occidentali nel reggiano, nelle Conoidi libere del Secchia, del Reno, del Savio e negli acquiferi dei Depositi delle Vallate Appenniniche di Sillaro-Santerno, Senio e Lamone (Figura 6.6). Isolati e modesti approfondimenti del livello di falda si notano anche in pianura, in particolare nei corpi idrici confinati superiori di Pianura Alluvionale Padana nel piacentino e nei corpi idrici confinati superiori di Pianura Alluvionale Appenninica del reggiano, ravennate e forlivese.

La distribuzione areale della soggiacenza media dei corpi idrici liberi e confinati inferiori, nel medesimo periodo 2016-2021, conferma quanto già osservato per i corpi idrici confinati superiori o quelli che sono idrogeologicamente a monte nelle zone di ricarica (Figura 6.7).

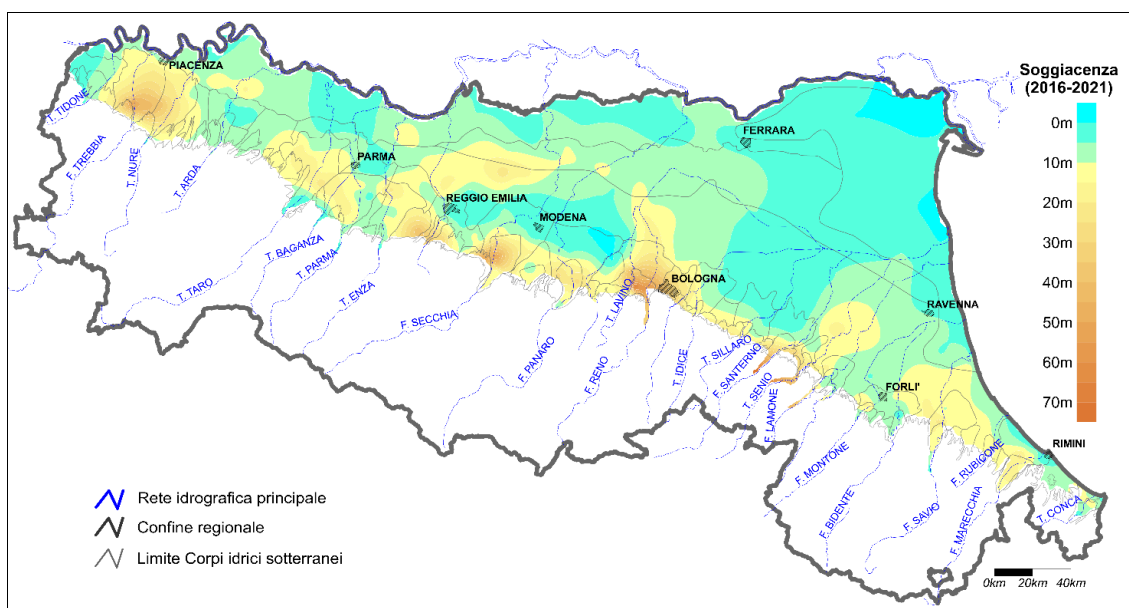


Figura 6.6: Carta della soggiacenza media nei Corpi idrici Liberi e Confinati superiori della Pianura Emiliano-Romagnola per il periodo 2016-2021.

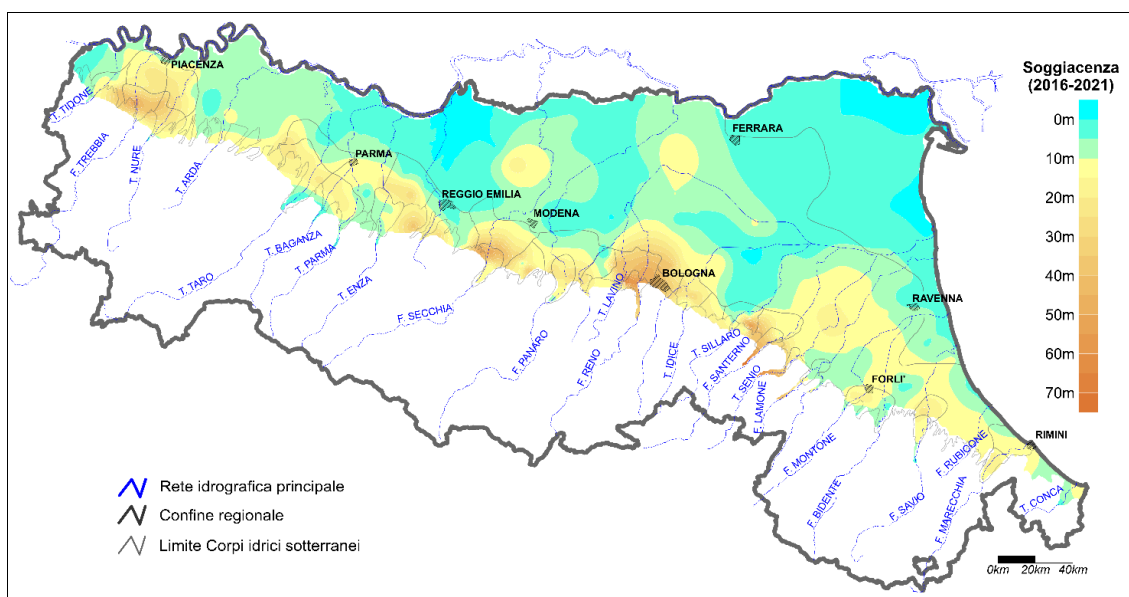


Figura 6.7: Carta della soggiacenza media nei Corpi idrici Liberi e Confinati inferiori della Pianura Emiliano-Romagnola per il periodo 2016-2021.

Per evidenziare le differenze di livello delle falde all'inizio e alla fine del periodo di monitoraggio della subsidenza, considerando che dal 2016 al 2021 i livelli si sono mediamente approfonditi, è stata calcolata la differenza dei livelli dell'anno 2021 rispetto al 2016 e nelle Figure 6.8 e 6.9 si presenta l'elaborazione rispettivamente per i corpi idrici liberi e confinati superiori e per quelli libero e confinati inferiori.

Le zone con differenza negativa (colore azzurro) sono quelle che hanno registrato un incremento dei livelli di falda, mentre le zone con differenza positiva (colore rosa e rosso) sono quelle che nel periodo hanno registrato una riduzione dei livelli e quindi un approfondimento delle falde. Si tratta nei diversi acquiferi sovrapposti della conoide Reno-Lavino nel bolognese, delle conoidi Nure e Arda nel piacentino, di zone del reggiano e parte del territorio di Rimini.

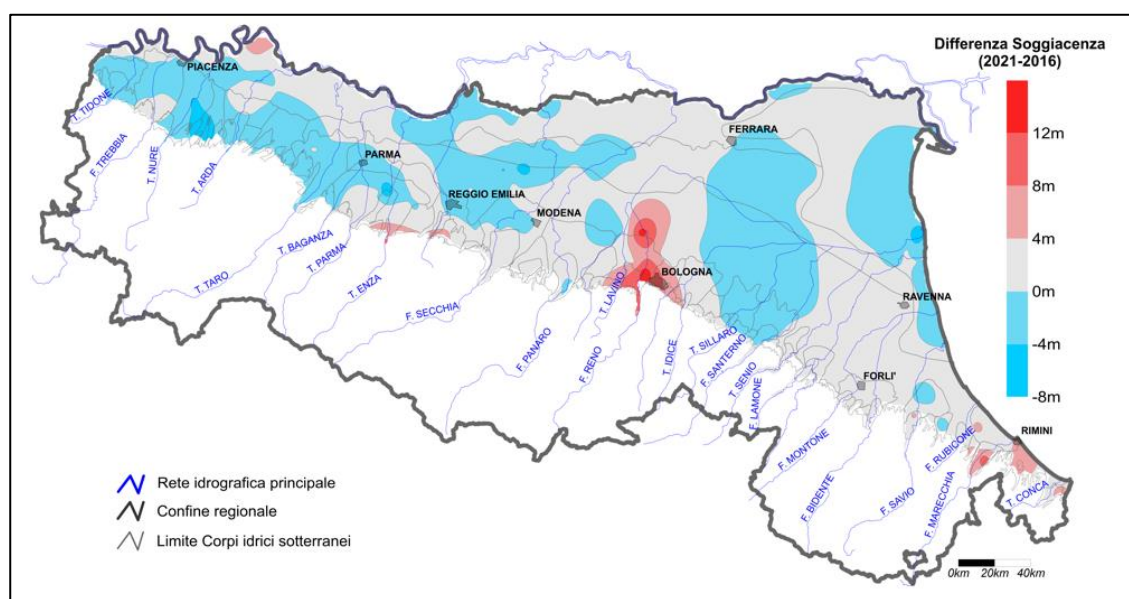


Figura 6.8: Carta della differenza dei valori di soggiacenza nei Corpi idrici Liberi e Confinati Superiori della Pianura Emiliano-Romagnola tra il 2016 e il 2021.

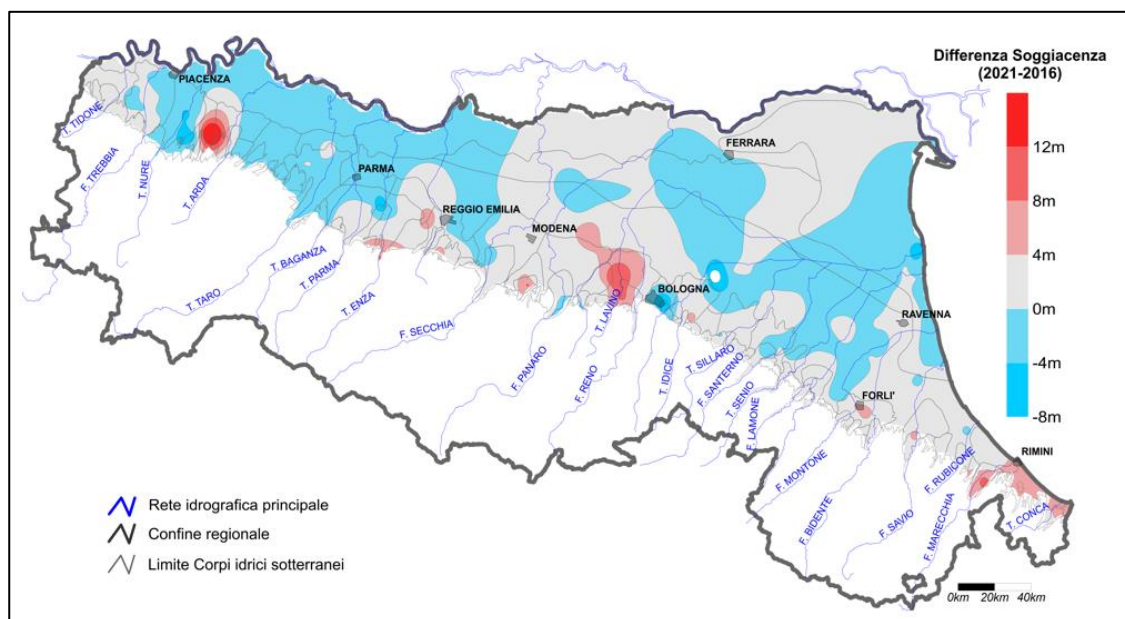


Figura 6.9: Carta della differenza dei valori di soggiacenza nei Corpi idrici Liberi e Confinati Inferiori della Pianura Emiliano-Romagnola tra il 2016 e il 2021.

6.2 Prelievi idrici da acque sotterranee e ricarica degli acquiferi

I dati relativi ai prelievi da acque sotterranee vengono distinti per categoria d'uso: civile (acquedottistico), industriale, agricolo (irriguo), zootecnico e piscicoltura (Figura 6.10). Inoltre vengono aggregati sia in base alle differenti tipologie di corpi idrici sotterranei sui quali gli stessi insistono, sia su base territoriale, con riferimento alla singola provincia.

La più recente stima sui prelievi di acque sotterranee in ambito regionale ammonta a circa 685 milioni di m³ ed è riportata nell'aggiornamento del Piano di Gestione del 2021, con dati medi annui riferibili, principalmente, al triennio 2016-2018 (Regione Emilia-Romagna, 2021) (Tabella 6.1 e Figura 6.11)). I prelievi da acque sotterranee avvengono principalmente tramite pozzi nei corpi idrici sotterranei di pianura, liberi, confinati superiori e confinati inferiori, siano essi di conoide o di pianura. Spostandosi più a sud, in ambito montano collinare, all'interno dei depositi delle vallate appenniniche, i prelievi avvengono solitamente mediante pozzi di subalveo o, in un qualche caso, attraverso gallerie drenanti. Nei corpi idrici montani i prelievi avvengono generalmente da sorgenti ed, in qualche caso, usufruendo di pozzi, per meglio intercettare i flussi sotterranei.

Quasi la metà dei prelievi da acque sotterranee sono legati al settore acquedottistico (47% pari a circa 320 Mm³/anno), poco più di 1/3 sono quelli stimati per l'uso agricolo, mentre l'industria appare pesare per il 16% circa.

Più del 60% del totale dei volumi di acqua estratti in ambito regionale (427 Mm³/anno) è attribuibile ai corpi idrici di conoide (liberi, confinati superiori e inferiori); i prelievi avvengono attraverso pozzi che, in alcune situazioni, possono captare acque da due corpi idrici sovrapposti lungo la verticale. Circa il 23% (156 Mm³/anno) dei prelievi è attribuibile ai corpi idrici confinati della Pianura Appenninica e Padana. I corpi idrici freatici di pianura (presenti nei primi 10-15 m dal piano campagna) sono solo marginalmente sfruttati e quasi esclusivamente per l'irrigazione (circa 24 Mm³/anno). I rimanenti prelievi, pari a poco più di 76 Mm³/anno, sono riferibili per metà ai corpi idrici montani, mentre l'altra metà risulta equamente suddivisa tra i depositi delle vallate appenniniche e le conoidi montane.

Analizzando i dati su base provinciale, a livello di volumi totali, sono preponderanti i quantitativi per le 5 province emiliane, da Piacenza a Bologna (82%), mentre, nelle altre 4, gli emungimenti risultano

molto più contenuti, soprattutto grazie alle infrastrutture sovraprovinciali esistenti, con approvvigionamenti superficiali, connesse all'irrigazione (CER da Po), all'acquedottistica (Romagna Acque da Ridracoli), all'industria (Canaletta ANIC da Reno-Lamone/CER e acquedotto industriale dai bacini di Bubano con presa da Santerno). In particolare, le 3 province con le maggiori estrazioni sono, nell'ordine: Parma (prima nell'industriale), Piacenza (prima per l'agricolo) e Modena (prima per il settore civile).

Il quadro relativo ai prelievi di acque sotterranee, ricostruito a supporto del Piano di Gestione 2021, risulta confrontabile con quello realizzato per il ciclo precedente di gestione delle acque (2015), con dati mediamente riferibili all'anno 2010 e per un totale complessivo pari a 730 Mm³/anno. Dal confronto emerge, relativamente all'ultimo periodo, un contenimento complessivo dei prelievi di acque sotterranee, pari al 6%, dovuto principalmente alla diminuzione dei prelievi industriali ed, in parte, di quelli acquedottistici. L'uso agricolo rimane pressoché stazionario.

Inoltre, viene evidenziata una fase di apprezzabile riduzione nel tempo (fino al 2010) dei volumi regionali complessivi, riferibile essenzialmente agli areali bolognesi e romagnoli. La diminuzione degli emungimenti idropotabili era connessa, soprattutto, alle importanti infrastrutture realizzate per l'approvvigionamento con acque superficiali (gli impianti sul Setta e quelli connessi a Ridracoli rendono disponibili circa 100 Mm³/anno di acqua potabilizzata); per il settore industriale la riduzione era legata anche a un progressivo declino delle attività produttive maggiormente idroesigenti, non agroalimentari; per il settore irriguo si valutava invece un leggero incremento.

I prelievi da acque sotterranee contribuiscono in misura pari al 30% al prelievo complessivo regionale, essendo il 70% soddisfatto da fonte superficiale. Escludendo dalla proporzione il contributo del Fiume Po per il settore irriguo, l'incidenza regionale degli emungimenti da acque sotterranee rispetto alle richieste complessive supererebbe il 60%.

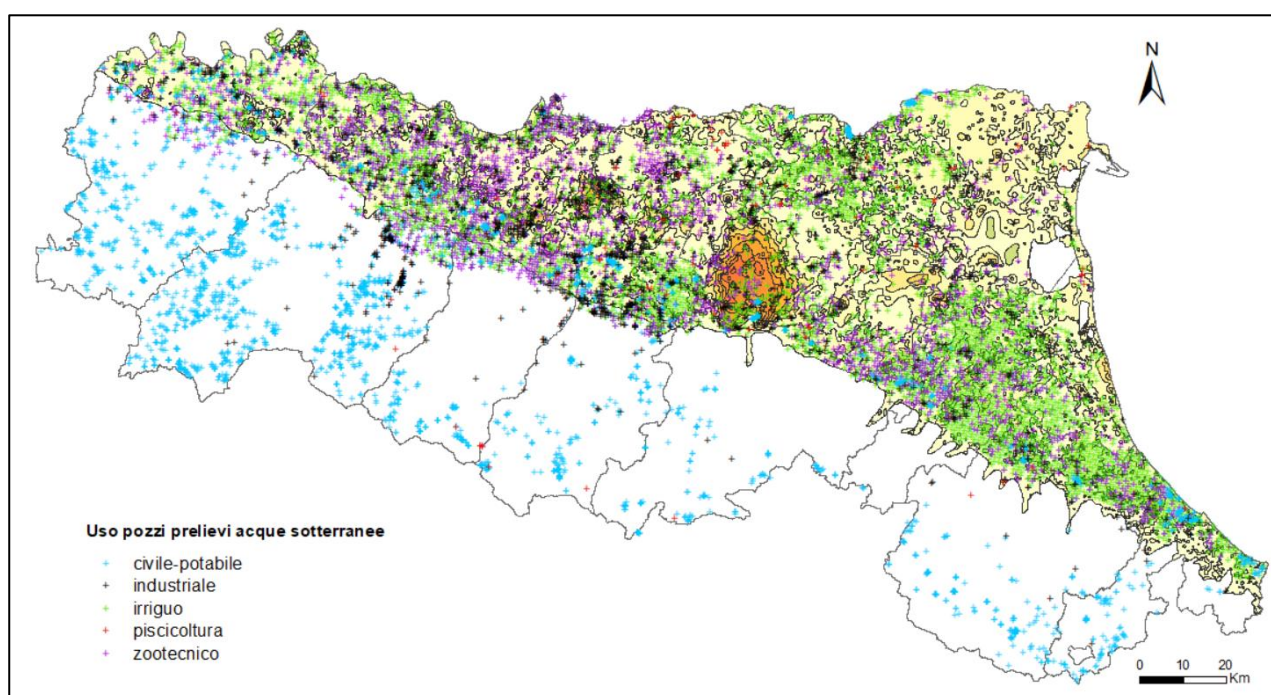


Figura 6.10: Ubicazione dei punti di prelievo di acque sotterranee per i diversi usi (2018) su carta delle velocità verticali del suolo 2016-2021

Tabella 6.1: Confronto tra i prelievi medi annui (Mm³/anno) di acque sotterranee 2010 e 2018, per provincia e per i diversi usi

	Industria		Civile		Agricoltura		Zootecnia		TOTALE	
Provincia	2010	2018	2010	2018	2010	2018	2010	2018	2010	2018
Piacenza	12,5	8,3	34,3	29,8	83,0	84,8	2,2	2,4	132,0	125,3
Parma	39,6	27,9	58,5	60,4	51,6	52,7	3,9	3,7	153,6	144,8
Reggio-Emilia	19,2	14,4	52,0	45,1	27,7	27,2	4,5	4,6	103,5	91,3
Modena	21,2	19,2	78,4	71,4	15,0	16,5	3,3	3,6	118,0	110,8
Bologna	13,8	17,7	52,7	54,8	15,6	14,7	1,0	0,8	83,1	88,1
Ferrara	5,9	3,0	16,6	21,3	9,0	5,8	0,6	1,0	32,1	31,6
Ravenna	11,7	8,0	1,7	1,6	23,1	19,0	0,6	1,0	37,1	29,7
Forlì-Cesena	7,2	8,0	12,4	10,0	13,1	10,7	1,4	1,6	34,2	30,3
Rimini	2,4	3,3	28,5	25,4	6,0	5,0	0,1	0,2	37,0	33,9
Totale	133,6	109,7	335,2	319,8	244,0	236,5	17,7	18,7	730,5	685,8
<i>Variazione</i>		-17,86%		-4,61%		-3,07%		5,54%		-6,12%

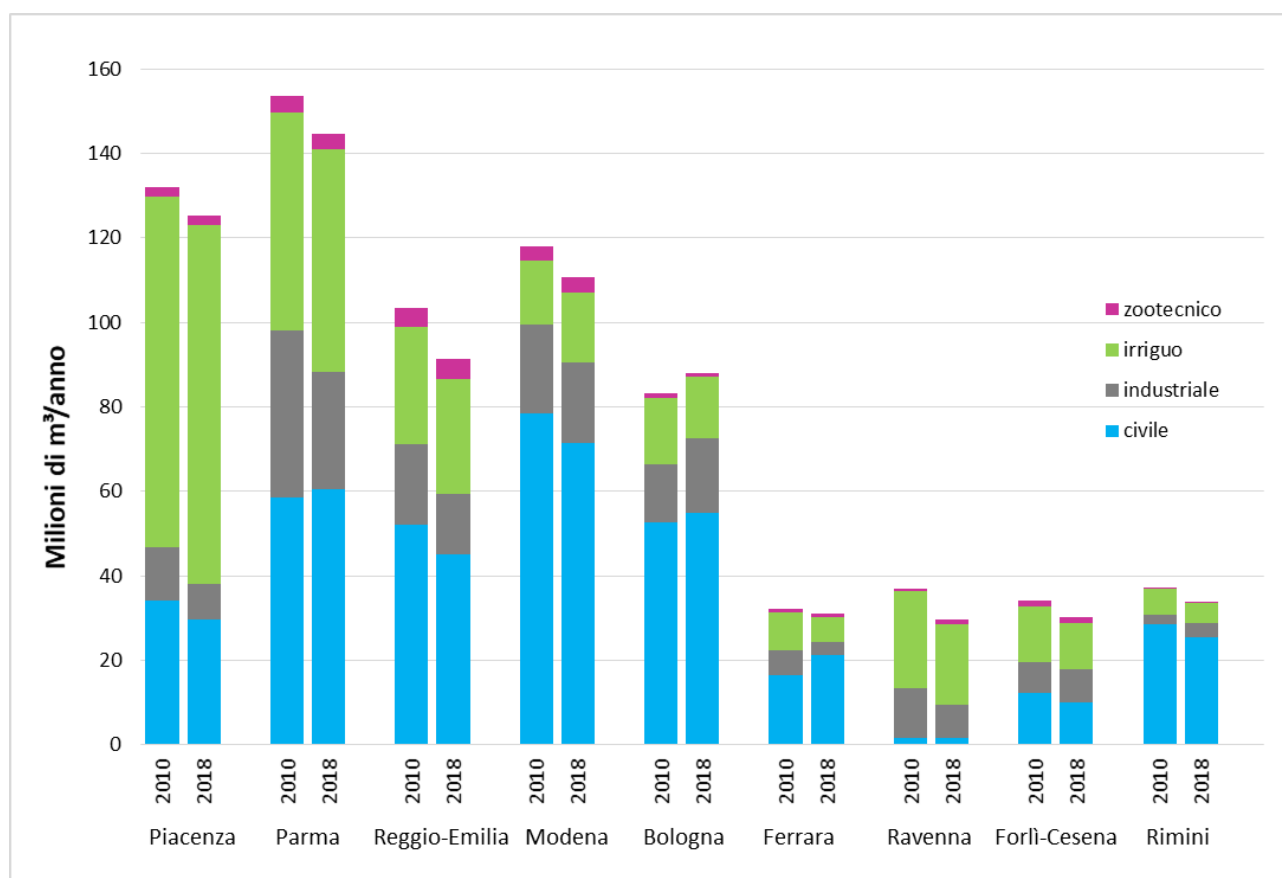


Figura 6.11: Prelievi medi acque sotterranee (Mm³/anno), per provincia e per i diversi usi (anni 2010 e 2018).

In Figura 6.12 sono visualizzati i dati di prelievo puntuale medio annuo al fine di evidenziare le zone di maggiore pressione antropica, considerando come già detto che dal 2010 al 2018 si è avuta una riduzione media del 6% dei prelievi che ha riguardato tutte le province a parte un leggero incremento a Bologna.

Considerando la riduzione dei prelievi e il contestuale approfondimento medio dei livelli di falda, più concentrato in alcuni areali e meno in altri, evidenzia un processo generalizzato di riduzione della ricarica degli acquiferi stessi, che è avvenuta in modo consistente nel periodo 2014-2016 e molto meno nel periodo 2016-2021 in coincidenza con il rilievo dei movimenti verticali del suolo.

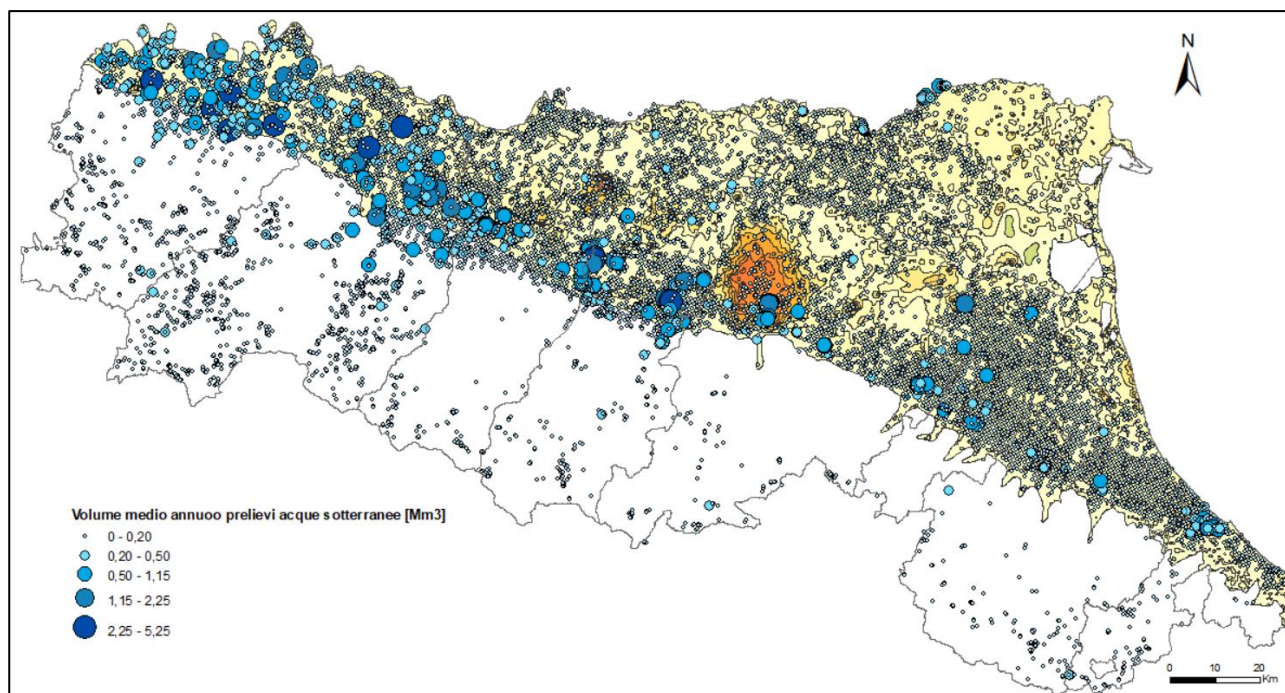


Figura 6.12: Ubicazione dei punti di prelievo di acque sotterranee e quantità media annua di prelievo (2018; Mm³/anno) per punto su carta delle velocità verticali del suolo 2016-2021

In Figura 6.13 sono rappresentate le precipitazioni medie annue per Comune nei periodi 2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021, coincidenti con i periodi del monitoraggio dei movimenti verticali del suolo, estratte dalla banca dati Arpa (Dati meteo-climatici giornalieri osservativi ottenuti dal dataset meteorologico ERG5 aggregati sui comuni dell'Emilia-Romagna; <https://dati.arpae.it/dataset/dati-meteoclimatici-comunali>). E' interessante osservare come progressivamente le precipitazioni siano diminuite in particolare nella zona ovest del territorio regionale e abbia piovuto meno anche nella fascia della isolinea dei 100 m s.l.m. che rappresenta in generale un riferimento di ubicazione delle aree di ricarica degli acquiferi profondi di pianura.

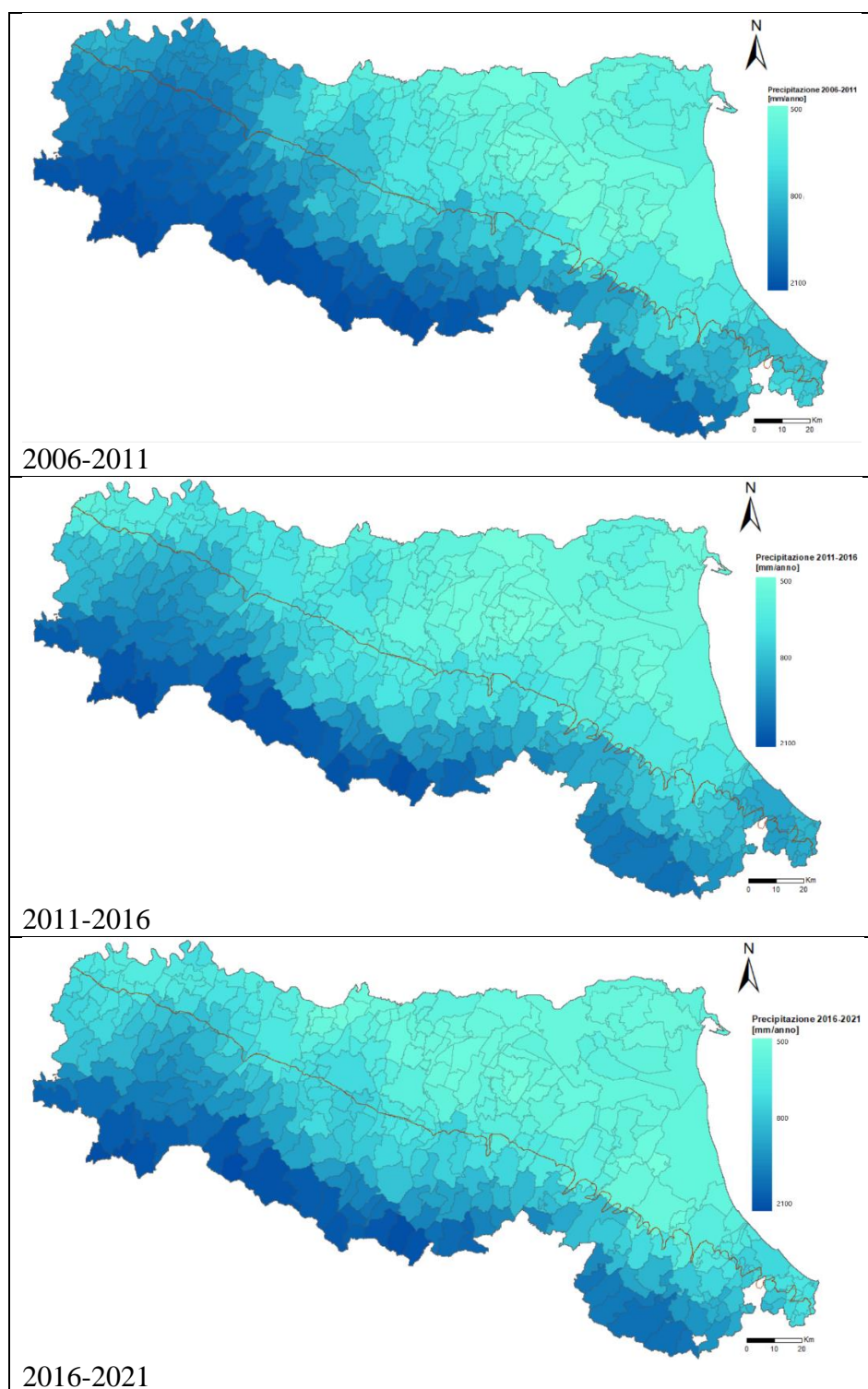


Figura 6.13: Precipitazioni medie annue per Comune nei periodi 2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021 (mm/anno) con isoline dei 100 m s.l.m.

6.3 Monitoraggio automatico della subsidenza tramite assestimetri

Il monitoraggio automatico dei movimenti verticali del suolo viene svolto nel bolognese attraverso 2 stazioni assestimetriche ubicate a Castel Maggiore, nella zona dove storicamente si registravano elevati valori di subsidenza. Gli assestimetri, uno ancorato a 100 m di profondità e il secondo a 200 m di profondità, sono stati installati nel 2005 (Regione Emilia-Romagna, 2005).

In Figura 6.14 sono riportati i dati di abbassamento (scala di sinistra) registrati dal 2005 dai due assestimetri che evidenziano, oltre la classica ciclicità stagionale, i movimenti verticali che fino al 2012 circa risultavano in abbassamento, successivamente fino al 2015-2016 in sollevamento e poi a seguire fino al 2022 in abbassamento. Sono andamenti in perfetta coerenza con quanto osservato nelle analisi interferometriche del bolognese dal 2006 al 2021. In Figura 6.14 sono stati riportati anche i dati interferometrici medi di 4 punti di misura (MP) ubicati in prossimità degli assestimetri, che dimostrano nel periodo 2016-2021 la medesima ciclicità osservata dagli assestimetri anche se con una velocità differente in quanto i punti di misura registrano i movimenti verticali del suolo complessivi, a differenza degli assestimetri che ne rappresentano solo la quota parte più superficiale. Nella stessa Figura 6.14 è stato aggiunto anche il livello delle falde (scala di destra) utilizzando due stazioni automatiche di monitoraggio del primo acquifero confinato, con filtri dai 32 ai 60 m di profondità. Si tratta di una stazione di monitoraggio ubicata in prossimità degli assestimetri e una seconda ubicata a qualche centinaio di metri dagli assestimetri stessi.

Il livello di falda rappresentato evidenzia quanto già illustrato a scala regionale, ovvero un primo incremento di livello fino al 2010-2011, una diminuzione del livello nel 2012 a causa della siccità di quell'anno, e poi un aumento del livello fino al 2015-2016, poi una progressiva diminuzione del livello fino al 2022 al netto delle ciclicità stagionali, che peraltro, per alcune annualità, sono in perfetta fase con le ciclicità dell'assestimento di 100 m, quello ancorato alla base dell'acquifero monitorato dalle due stazioni automatiche delle acque sotterranee.

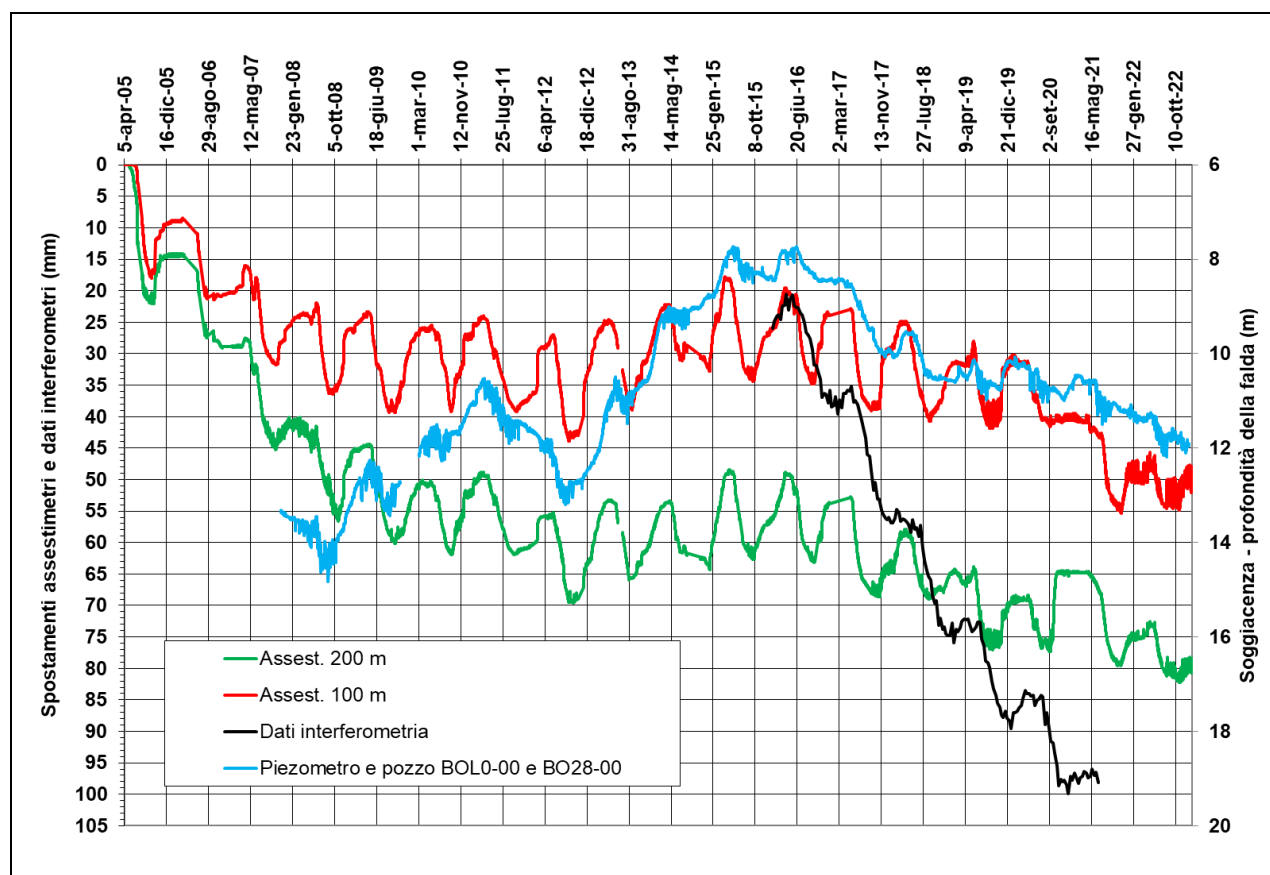


Figura 6.14: Andamento degli abbassamenti registrati dagli assestimetri ubicati a Castel Maggiore (BO), dati interferometrici di punti di misura in prossimità degli assestimetri e livello della prima falda confinata in prossimità degli assestimetri

Conclusioni

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo viene svolto in Emilia-Romagna da oltre 20 anni con frequenza quinquennale nella sola porzione di territorio di pianura. Nel presente documento sono riassunte le principali attività svolte per l'aggiornamento della cartografia di subsidenza al periodo 2016-2021, con l'obiettivo di valutare l'evoluzione del fenomeno della subsidenza nella zona di pianura per confronto con i risultati dei precedenti periodi di monitoraggio. Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo nel periodo 2016-2021 ha utilizzato l'analisi interferometrica di radar satellitari, tramite la tecnica SqueeSAR™, con calibrazione dei risultati tramite i dati di movimento verticale di stazioni permanenti GNSS, come già effettuato nei precedenti periodi di monitoraggio.

Le attività sono state precedute da una verifica delle evoluzioni tecnologiche intervenute negli ultimi anni nell'ambito del rilievo satellitare e della tipologia di dati radar satellitari disponibili, al fine di avere una copertura omogenea dell'intero territorio regionale e del periodo temporale 2016-2021, con la possibilità di disporre di acquisizioni in doppia geometria, ascendente e discendente, per valutare anche gli spostamenti orizzontali del suolo, che i dati permettessero di ottenere risultati confrontabili con quelli dei precedenti monitoraggi.

I dati interferometrici utilizzati sono quelli della costellazione dei satelliti Sentinel-1 del Programma europeo Copernicus, che ha permesso di ottenere, rispetto al precedente monitoraggio effettuato nel 2011-2016, diversi aspetti migliorativi, tra cui: analizzare il fenomeno per l'intero periodo 2016-2021 e per l'intero territorio regionale, compresa per la prima volta anche la porzione di territorio collinare e montana, utilizzando solo dati Sentinel-1; aumentare la frequenza di monitoraggio, tenendo conto che Sentinel-1 ha un minore tempo di rivisitazione rispetto i satelliti Radarsat-2 utilizzati nel precedente rilievo; elaborazione dei dati osservati dal satellite in doppia geometria, sia ascendente sia discendente, in modo da ottenere per la prima volta in Emilia-Romagna anche i movimenti orizzontali del suolo nella direzione est-ovest.

L'analisi interferometrica dei dati Sentinel-1 per il periodo 2016-2021 dell'intero territorio regionale di oltre 22.000 km², ha restituito un dataset contenente i singoli spostamenti e la velocità media di spostamento lungo la linea di osservazione del satellite di 13.555.277 punti di misura a terra, tenendo conto delle zone di sovrapposizione delle 4 track di acquisizione del satellite che comprendono le geometrie ascendenti e discendenti.

La combinazione dei dati ascendenti e discendenti delle oltre 13 milioni di osservazioni ha consentito di ottenere la scomposizione del moto nella componente verticale e orizzontale (est-ovest), attraverso il ri-campionamento su una griglia regolare con maglia 50x50 m, e restituendo queste informazioni per un totale di 704.444 punti di misura a scala regionale. Questa modalità di elaborazione è stata necessaria per l'elaborazione dei dati in doppia geometria, attività che non è stata svolta nei precedenti monitoraggi in quanto i dati si riferivano alla singola geometria ascendente.

Il dataset così ottenuto è stato poi calibrato utilizzando 21 stazioni permanenti GNSS e utilizzando ulteriori 7 stazioni GNSS per effettuare la validazione post-elaborazione della calibrazione stessa. I risultati ottenuti dalla validazione della calibrazione si possono considerare del tutto soddisfacenti e volendo attribuire una soglia d'incertezza complessiva dell'intera analisi di velocità di spostamento effettuata, si ritiene che possa essere considerato il valore di circa ± 2 mm/anno, già evidenziato anche nella precedente analisi 2011-2016.

Il dataset così ottenuto è stato sottoposto a verifiche e validazione dei singoli punti di misura al fine di eliminare i dati ritenuti anomali (outliers) e non rappresentativi del fenomeno a scala regionale ma generalmente riconducibili ad attività antropiche di gestione del territorio e urbanizzazione. Questa attività ha permesso di ottenere il dataset finale che per la zona di pianura ha permesso di elaborare la cartografia dei movimenti verticali del suolo nel periodo 2016-2021 utilizzando un totale di 552.581 punti di misura.

La cartografia finale dei movimenti verticali del suolo della pianura dell'Emilia-Romagna per il periodo 2016-2021 è stata elaborata attraverso una spazializzazione del dataset derivante dall'analisi interferometrica calibrata con stazioni GNSS e dopo verifica ed eliminazione degli outlier, producendo un grigliato con maglia di dimensioni pari a 100x100 m e co-registrato con i grigliati calcolati nei precedenti periodi di monitoraggio, al fine di supportare le comparazioni dei risultati in ambiente GIS. Sono state eliminate dalla cartografia finale le aree occupate dalle acque superficiali di transizione, come ad esempio le Valli di Comacchio, e sono state restituite le curve isocinetiche con passo di 2,5 mm/anno.

Il monitoraggio aggiornato al 2016-2021 è stato confrontato con quelli precedenti 2011-2016 e 2006-2011 che sono stati effettuati con la stessa metodologia di analisi interferometrica, anche se nell'ultimo monitoraggio l'analisi è avvenuta in doppia geometria.

Nel periodo 2016-2021 risulta che la velocità media verticale del suolo nella porzione di pianura è compresa tra 0 e -5 mm/anno nell'89,6% del territorio, il 6,1% nella classe -5 e -10 mm/anno e il 2,9% nelle classi con velocità inferiore a -10 mm/anno. A scala regionale, dal 2006 al 2021, è progressivamente diminuita la classe di velocità da 5 a 0 mm/anno (in sollevamento) aumentando contestualmente la classe di velocità da 0 a -5 mm/anno, e si sono ridotte progressivamente le classi con velocità di subsidenza più elevate, fino a dimezzare nell'ultimo periodo quella da -5 a -10 mm/anno rispetto al periodo 2006-2011.

Dal confronto delle velocità di movimento dell'ultimo periodo 2016-2021 con il precedente (2011-2016) emerge che l'85,48% del territorio di pianura non presenta variazioni di tendenza significative, l'11,17% è interessato da un incremento dell'abbassamento, mentre una tendenza alla riduzione degli abbassamenti si evidenzia per il 3,36 % della superficie.

Questi risultati a scala provinciale evidenziano che le province di Piacenza, Parma e Reggio Emilia presentano una diffusa variazione negativa, mentre in passato avevano sempre evidenziato tendenze medie alla risalita della superficie topografica. Bologna presenta l'ampio areale a nord della città con variazione negativa mentre a est di Bologna si evidenziano piccoli areali alcuni in miglioramento altri in peggioramento. Modena, Ravenna e Ferrara presentano anch'esse alcuni areali in miglioramento, come anche Ravenna che presenta le zone più estese in miglioramento anche lungo la costa, e zone arealmente molto limitate e frammentate in peggioramento. Infine al confine tra Cesena e Rimini si evidenzia una zona in peggioramento.

Nella provincia di Piacenza, oltre alla progressiva e lenta riduzione delle aree in sollevamento, che aveva caratterizzato questo territorio fino al 2016, sono presenti alcune zone relativamente localizzate con valori negativi, una compresa tra le località Mottaziana e Gragnano Trebbiense e una tra Pontenure, Carpaneto Piacentino e Fiorenzuola d'Arda.

La provincia di Parma evidenzia che le aree in sollevamento sono ora pressoché assenti, mentre quelle con valori negativi e comunque di modesta entità sono molto localizzate e pertanto non si riscontrano areali critici di dimensioni significative.

Nella Provincia di Reggio Emilia le aree in sollevamento sono pressoché assenti e comunque arealmente poco significative, mentre persistono 2 zone in abbassamento: una è l'area industriale a nord del capoluogo con valori massimi simili a quelli riscontrati nel passato pari a circa 10 mm/anno e l'altra è l'area industriale a est di Correggio con valori che risultano nell'ultimo periodo in peggioramento rispetto al passato. La carta delle variazioni di velocità evidenzia anche una zona in incremento a ovest del centro urbano di Reggio Emilia.

Nella provincia di Modena persistono velocità elevate in corrispondenza delle aree artigianali ad ovest di Carpi, territorio contiguo alla criticità osservata per Reggio Emilia. Altri areali critici ma di ridotte

dimensioni sono ubicati a sud di Soliera e a Bomporto le cui velocità nell'ultimo periodo risultano in attenuazione, come anche l'area a nord del capoluogo.

Nella provincia di Bologna, in particolare la zona di pianura a nord del capoluogo, ha registrato storicamente valori elevati di subsidenza che nel tempo sono sempre risultati in progressiva diminuzione, e nel precedente rilievo 2011-2016 sono risultati in forte diminuzione e in alcuni areali si sono registrate anche velocità positive (in sollevamento), le cui ragioni erano legate principalmente alla riduzione degli emungimenti di acque sotterranee e al regime climatico del periodo. La situazione attuale fa registrare invece un incremento degli abbassamenti in tutto l'areale storicamente critico, ma con tassi meno elevati rispetto il passato. Altri areali con criticità relativa e con estensione seppure più ridotta, comunque significativa, sono ubicati a Budrio e a sud di Castel Guelfo. Le variazioni di velocità recenti evidenziano che le velocità nell'areale di Budrio sono in attenuazione, mentre a sud di Castel Guelfo sono in leggero incremento. Altro areale in incremento risulta a nord di Ozzano dell'Emilia.

Nella provincia di Ferrara si riscontra una situazione pressoché stabile negli ultimi periodi di monitoraggio, i valori minimi registrati in alcuni punti nei diversi periodi sono confrontabili. Le aree in sollevamento sono prevalentemente ubicate in prossimità delle Valli del Mezzano.

Nella provincia di Ravenna si riscontra una situazione complessivamente stazionaria rispetto il precedente periodo di monitoraggio e in leggero miglioramento rispetto al monitoraggio 2006-2011. Le aree con velocità verticali positive (in sollevamento) sono prevalentemente ubicate a est di Faenza, mentre per il resto sono assenti o comunque arealmente poco significative. Sono presenti alcuni areali di ridotte dimensioni con valori di velocità di abbassamento che raggiungono al massimo 10 mm/anno in corrispondenza di Cotignola e ad ovest di Faenza. Anche lungo la costa (Fiumi Uniti e Lido di Dante) permangono valori significativi in abbassamento anche se risultano in miglioramento rispetto l'ultimo rilievo con valori attuali di circa 7,5 e massimi di 10 mm/anno.

Anche nella provincia di Forlì-Cesena si riscontra una situazione nel complesso stazionaria rispetto il precedente periodo di monitoraggio e in leggero miglioramento rispetto al monitoraggio 2006-2011. Le aree con velocità verticali positive (in sollevamento) sono prevalentemente ubicate al confine con la Provincia di Ravenna a est di Faenza, mentre per il resto sono assenti o comunque arealmente poco significative. Permane un areale critico a est di Savignano sul Rubicone con velocità di oltre 15 mm/anno in aumento rispetto l'ultimo rilievo.

Nella provincia di Rimini si riscontra una situazione complessivamente stazionaria nel tempo, anche se permane la criticità localizzata nell'area prossima a Savignano sul Rubicone, al confine nord di provincia.

Sul litorale, continua la tendenza, già manifestatasi con il precedente rilievo, ad una diminuzione della subsidenza, dove le velocità verticali non superano i 10 mm/anno che si raggiungono nella zona della foce dei Fiumi Uniti tra Lido Adriano e Lido di Dante. Le velocità riscontrate nell'ultimo periodo risultano in attenuazione rispetto a quelle del periodo 2011-2016, in particolare da Ravenna a Rimini, dove, in particolare, le velocità di Lido di Dante si sono circa dimezzate.

Le velocità verticali e orizzontali calcolate per la prima volta nel territorio collinare e montano hanno permesso di fare solo alcune valutazioni molto preliminari in relazione all'Inventario dei Fenomeni franosi disponibile per l'Emilia-Romagna.

L'analisi infine dei prelievi da acque sotterranee ha evidenziato che dal 2010 al 2018 si è avuta una riduzione media del 6% dei prelievi che ha riguardato tutte le province a parte un leggero incremento a Bologna per il settore industriale e acquedottistico.

Contestualmente però l'analisi dei livelli di falda ha evidenziato che nel periodo 2016-2021, coincidente con le elaborazioni interferometriche, i livelli di falda sono in diminuzione in modo generalizzato in tutte le tipologie di corpi idrici sotterranei di pianura dell'Emilia-Romagna, al contrario del periodo precedente, 2010-2011 e 2014-2016, quando i livelli di falda avevano subito un significativo incremento prevalentemente per effetto della consistente ricarica meteorica. Questo effetto è stato molto evidente nella conoide del Reno-Lavino a nord della città di Bologna, dove la soggiacenza è risalita in alcuni punti di circa 15 metri.

Una valutazione delle precipitazioni dal 2006 al 2021 evidenzia come siano diminuite in particolare nella zona ovest del territorio regionale e abbia piovuto meno anche nella fascia della isolina dei 100 m s.l.m. che rappresenta in generale un riferimento di ubicazione delle aree di ricarica degli acquiferi profondi di pianura.

Le condizioni climatiche, in particolare le precipitazioni, a parità di prelievi idrici da acque sotterranee, possono influire sul regime di ricarica degli acquiferi e avere effetti sulle variazioni verticali del suolo, come evidenziato per l'area di conoide Reno-Lavino anche attraverso le valutazioni dei dati automatici ad alta frequenza degli assestimetri congiuntamente ai livelli di falda.

Documenti di riferimento

- Altamimi, Z., 2018. EUREF Technical Note 1: Relationship and transformation between the international and the European terrestrial reference systems. Published by EUREF
- Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno, 2005. Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche. Rapporto tecnico, Arpa Emilia-Romagna, Bologna, 126 pp. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/conoide-alluvionale-fiume-reno-modello-idrogeologico/view>
- Arpae Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, 2012. Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola – Seconda fase. Rapporto tecnico, Arpae Emilia-Romagna, Bologna, 44 pp. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/rilievo-della-subsidenza-nella-pianura-er-seconda-fase-2012.pdf/view>
- Arpae Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, 2018. Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola – Seconda fase. Rapporto tecnico, Arpae Emilia-Romagna, Bologna, 105 pp. <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/rilievo-della-subsidenza-nella-pianura-er-seconda-fase-1.pdf/view>
- Ayhan, M.E., Almuslmani, B., 2021. Positional accuracy and convergence time assessment of GPS precise point positioning in static mode. Arab J Geosci 14, 1263
- Bitelli G., Bonsignore F., Del Conte S., Franci F., Lambertini A., Novali F., Severi P., Vittuari L., 2020. Updating the subsidence map of Emilia-Romagna region (Italy) by integration of SAR interferometry and GNSS time series: The 2011-2016 period, in: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Copernicus GmbH, «PROCEEDINGS OF IAHS», 2020, 382, pp. 39 - 44 (atti di: 10th International Symposium on Land Subsidence, TISOLS 2020, nld, 2021)
- Blewitt, G., Lavallée D., 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity. J. Geoph. Research, Vol.107, No. B7.
- Dialuce G., Dell’Orso M., Antoncetti I., Ciccone F., Giordano A., Colucci F., Moia F., Billi A., Carminati E., Cuffaro M., D’Ambrosio A., Doglioni C., Livani M., Maffucci R., Petricca P., Petracchini L., Benetatos C., Rocca V., Bonano M., De Luca C., Lanari R., Manzo M., Gandolfi S., Macini P., Poluzzi L., Tavasci L., Albano M., Anderlini L., Avallone A., Cavaliere A., D’Agostino N., Devoti R., Palano M., Pezzo G., Pietrantonio G., Polcari M., Randazzo D., Riguzzi F., Secreti V., Selvaggi G., Serpelloni E., Sparacino F., Trasatti E., Severi P., Perini L., 2021. Progetto subsidenza - Studio multidisciplinare per la valutazione delle deformazioni del suolo finalizzato allo sviluppo di un modello per il monitoraggio integrato. Report integrato di fine progetto. Attività svolta nell’ambito del Programma CLYPEA – Innovation Network for Future Energy, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico su fondi per la “sicurezza offshore” ai sensi dell’art. 35 D.L. 83/2012. Ministero dello Sviluppo Economico, Roma. ISBN 9788894366969.
- Gandolfi, S., Tavasci, L., Poluzzi, L., 2016. Improved PPP performance in regional networks. In: GPS Solutions, 20, 485–497. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0459-z>
- Gandolfi, S., Poluzzi, L., 2013. Procedure automatiche per il monitoraggio di reti di stazioni permanenti GNSS mediante approccio Precise Point Positioning. Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, (1), 41-53.
- Herring T., 2003. MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series. GPS Solutions, 7, 194-199
- Idroser, 1978. Progetto di piano per la salvaguardia e l’utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna

- Khan R., Li H., Afzal Z., Basir M., Arif M., Hassan W. 2021. Monitoring Subsidence in Urban Area by PSInSAR: A Case Study of Abbottabad City, Northern Pakistan. *Remote Sens.* 2021, 13, 1651. <https://doi.org/10.3390/rs13091651>
- Kouba, J., and Héroux, P., 2001. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2), 12.
- Millard Koreen, Patrick Kirby, Sacha Nandlall, Amir Behnamian, Sarah Banks, Fabrizio Pacini, 2020. Using Growing-Season Time Series Coherence for Improved Peatland Mapping: Comparing the Contributions of Sentinel-1 and RADARSAT-2 Coherence in Full and Partial Time Series. *Remote Sensing* 12, no. 15: 2465. <https://doi.org/10.3390/rs12152465>
- Mora O., Mallorqui J., Broquetas A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images, 41, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 10.1109/TGRS.2003.814657
- Regione Emilia-Romagna, 2005. Piano di Tutela delle Acque. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 40 del 21/12/2005.
- Regione Emilia-Romagna, 2006. Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia. Progetto IFFI. Relazione tecnica. 26pp. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/cartografia-dissesto-idrogeologico#consulta-dati-pdf>
- Regione Emilia-Romagna, 2021. Delibera di Giunta n. 2293, “Direttiva 2000/60/CE (Direttiva Quadro Acque) Terzo ciclo di Pianificazione 2022-2027: Presa d'atto degli elaborati costituenti il contributo della Regione Emilia-Romagna ai fini del riesame dei Piani di Gestione Distrettuali 2021-2027 dei Distretti del Fiume Po e dell'Appennino Centrale”. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/acque/temi/piani%20di%20gestione>
- Solari L, Del Soldato M, Bianchini S, Ciampalini A, Ezquerro P, Montalti R, Raspini F, Moretti S, 2018. From ERS 1/2 to Sentinel-1: Subsidence monitoring in Italy in the last two decades. *Front. Earth Sci.* 6:149. doi: 10.3389/feart.2018.00149
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H., 1997. *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), 5005.

Allegati

Allegato 1: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Scala 1:250.000

Allegato 2: Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2011-2016 al periodo 2016-2021. Scala 1:250.000

Allegato 3: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000

Allegato 4: Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021. Zona costiera. Scala 1:100.000