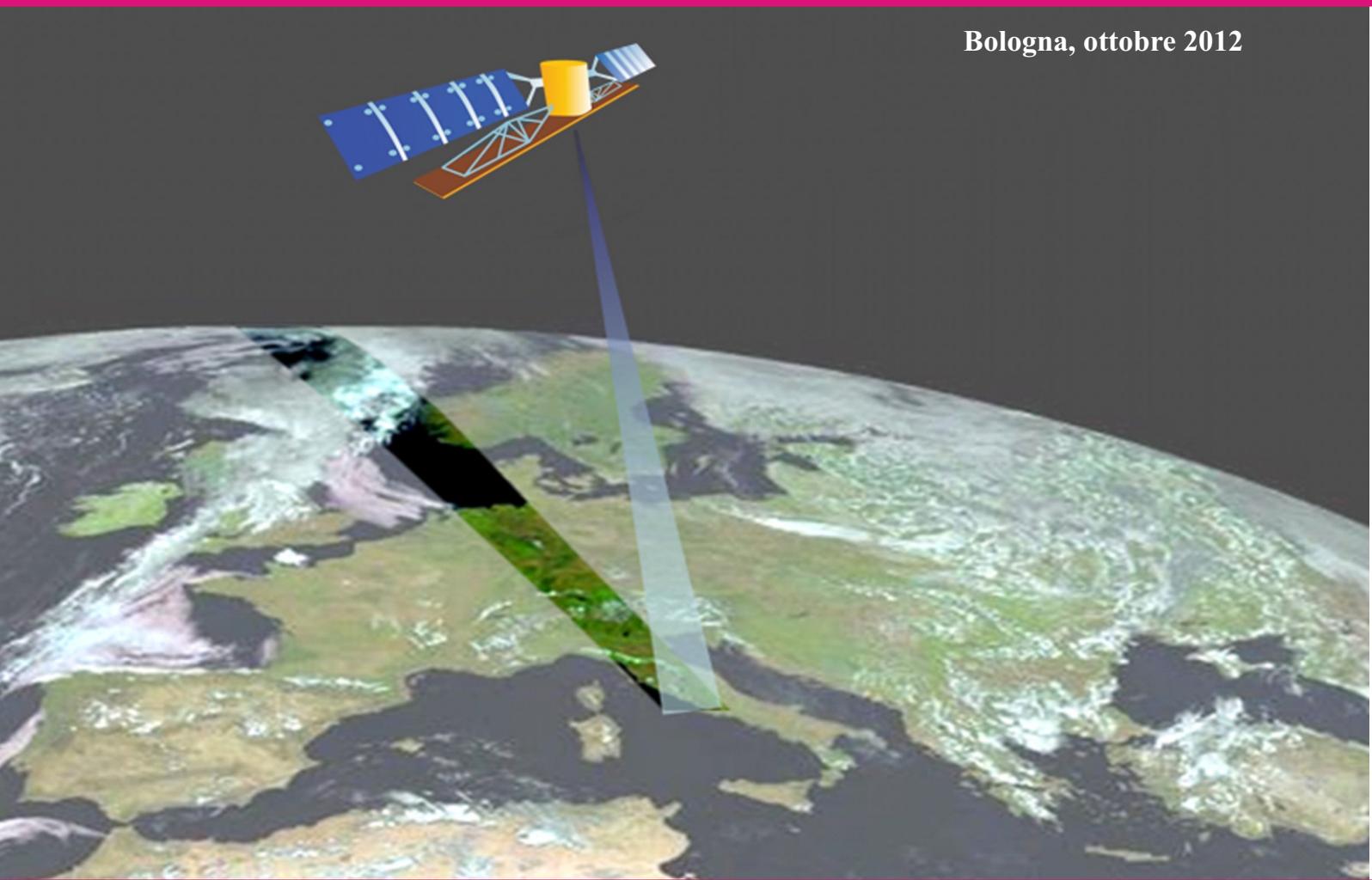


RILIEVO DELLA SUBSIDENZA NELLA PIANURA EMILIANO-ROMAGNOLA

SECONDA FASE

Bologna, ottobre 2012



RELAZIONE FINALE

Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

Rosanna Bissoli, Responsabile del Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, Assessorato Ambiente e Riqualificazione Urbana.

Immacolata Pellegrino e Andrea Rapino, Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, Assessorato Ambiente e Riqualificazione Urbana.

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

Flavio Bonsignore - Responsabile del progetto (ARPA, Direzione Tecnica).

Gabriele Bitelli, Luca Vittuari (DICAM - Università di Bologna) - Verifica e calibrazione dei dati interferometrici e predisposizione della cartografia.

Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l. - Analisi interferometrica.

Monica Branchi (ARPA, Direzione Tecnica) - elaborazioni cartografiche.

Immagine di copertina: fonte Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l., elaborazione grafica di Leda Ferrari.

INDICE

1. Premessa	3
2. Analisi interferometrica. Calibrazione e verifiche	4
2.1 <i>Introduzione</i>	4
2.2 <i>Dati elaborati</i>	5
2.3 <i>Definizione di un datum di velocità e calibrazione</i>	9
2.4 <i>Verifica e validazione dei bersagli radar</i>	16
3. Analisi dei movimenti verticali del suolo	27
3.1 <i>Introduzione</i>	27
3.2 <i>Analisi dei movimenti</i>	30
4. Conclusioni	40

ALLEGATI

1. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Scala 1:250.000;
2. Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2002-2006 al periodo 2006-2011. Scala 1:250.000.
3. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000;
4. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Zona costiera. Scala 1:100.000.

1. Premessa

La Regione Emilia-Romagna con Del. n. 2032 del 27/12/2011 ha affidato ad ARPA la realizzazione delle attività inerenti il progetto “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Seconda Fase”, secondo le modalità contenute nella convenzione approvata con lo stesso atto.

Il progetto costituisce la fase conclusiva del lavoro “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Prima Fase” affidato dalla Regione Emilia-Romagna ad ARPA con Del. n. 2120 del 27/12/2010 e conclusosi con la consegna della relazione finale nel dicembre 2011.

Nella **prima fase** del lavoro sono state realizzate le seguenti attività:

1. analisi interferometrica di dati satellitari - lo stesso metodo con il quale si è proceduto nell’ambito della precedente campagna di rilievo del 2005-07;
2. elaborazione dei dati acquisiti da 17 stazioni permanenti GPS presenti nell’area d’indagine, inquadramento di tali stazioni nel Sistema Internazionale ITRF e prima calibrazione dell’analisi interferometrica.

La **seconda fase** del lavoro, oggetto del presente incarico, porta a compimento le elaborazioni avviate nella prima fase, tramite verifica e validazione dei dati interferometrici e realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo, periodo 2006-2011, relativamente all’intero territorio di pianura emiliano-romagnolo.

2. Analisi interferometrica. Calibrazione e verifiche

2.1 Introduzione

Nel 2007 Arpa, su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il DISTART dell'Università di Bologna, ha realizzato la carta delle velocità di movimento verticale del suolo, periodo 2002-2006, relativa all'intera pianura emiliano-romagnola¹. Per l'elaborazione di tale cartografia venne utilizzato, per la prima volta a scala regionale, il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari, con tecnica PSInSARTM, supportato da misure di livellazione geometrica di alta precisione². In particolare, vennero elaborate immagini acquisite dai satelliti ERS1 ed ERS2 in geometria discendente nel periodo 1992-2000, immagini acquisite dal satellite ENVISAT in geometria sia ascendente sia discendente nel periodo 2002-2006 ed immagini acquisite dal satellite RADARSAT-1 in geometria ascendente nel periodo 2003-2005.

Con il presente lavoro, si è proceduto ad aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza già acquisite con il precedente rilievo, tramite l'elaborazione con tecnica SqueeSARTM (algoritmo PSInSARTM di seconda generazione), di immagini radar acquisite dal satellite RADARSAT-1 nel periodo 2006-2011.

Al fine di calibrare l'analisi interferometrica, si è prevista l'elaborazione di un congruo numero di stazioni permanenti GPS. L'utilizzo delle stazioni GPS era già stato preso in considerazione in sede di progettazione del precedente rilievo, ma fu momentaneamente accantonato in ragione dell'esiguità di stazioni esistenti, tale da non poter garantire una corretta calibrazione dei dati interferometrici. L'aumentata disponibilità di stazioni permanenti GPS negli ultimi anni, fa sì che tali dati possano essere ora proficuamente utilizzati in sostituzione delle livellazioni geometriche, realizzando, in tal modo, anche un significativo contenimento dei costi.

Il rilievo 2006-2011 è stato realizzato in due fasi:

Nella **prima fase**, oggetto di incarico da parte della Regione ad ARPA (2011)³, è stata effettuata l'analisi interferometrica tramite la tecnica SqueeSARTM dei dati radar satellitari acquisiti sull'area d'indagine. È stato così possibile individuare e localizzare i punti di misura (PS e DS)⁴ presenti, stimare le loro velocità medie annue di spostamento (in mm/anno) nel periodo 2006-2011 e stimare le serie storiche di spostamento dei PS e dei DS (in mm) nello stesso periodo. Contemporaneamente sono stati elaborati i dati acquisiti da 17 stazioni GPS permanenti al fine di calibrare e verificare, tramite valori di velocità di movimento verticale, i dati relativi provenienti dall'analisi SqueeSARTM. In tal modo, per la prima volta nel rilievo della subsidenza in Emilia-Romagna, si è andati verso il superamento del concetto di punto di riferimento assoluto all'interno di una rete geodetica - storicamente assunto a priori come fisso ed immutabile nel tempo sulla base di considerazioni di generica stabilità del contesto

¹ Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2007), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia -Romagna.

² Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2005), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2006), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. II° Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

³ Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2011), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Prima fase*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

⁴ PS - Permanent Scatterer, DS - Distributed Scatterer.

geologico strutturale dell'area. In sostanza, la singola stazione GPS diviene essa stessa un punto di riferimento, non già in virtù di una presunta stabilità assoluta, bensì grazie alla conoscenza precisa dei suoi movimenti misurati nel tempo. Già in questa prima fase si è proceduto ad una calibrazione preliminare dei risultati dell'analisi SqueeSAR™, tramite i dati di movimento verticale ottenuti dall'elaborazione di sei stazioni permanenti GPS, opportunamente selezionate rispetto alle 17 stazioni complessivamente elaborate.

Nella **seconda fase** del lavoro (2012), oggetto della presente relazione, è stata realizzata la verifica e la validazione dei dati interferometrici utilizzando, oltre alle 6 stazioni già dette, altre 10 stazioni GPS⁵; a tal fine, si è proceduto alla definizione di un *datum* di velocità per l'asservimento alle analisi interferometriche differenziali SAR e alla verifica, a posteriori, sull'efficacia del suo utilizzo per la calibrazione del dato interferometrico. Successivamente sono state condotte analisi statistiche sulla distribuzione spaziale e sulla tipologia dei PS/DS (318.625) con implementazione di procedure di screening e validazione del dataset complessivo al fine di individuare e rimuovere i punti considerati fuorvianti (outliers) ai fini della realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo, periodo 2006-2011. Sono stati individuati 3.543 punti; tra questi, la gran parte sono risultati essere punti isolati con andamento anomalo rispetto all'intorno; in misura minore, sono stati evidenziati anche cluster di punti per i quali si è poi proceduto a verifiche visive su immagini satellitari al fine di decidere l'opportunità o meno di un loro mantenimento nel dataset nell'ottica di una rappresentazione dei movimenti a scala regionale. Ottenuto così il dataset definitivo si è proceduto all'interpolazione dei punti (scatterers) per la produzione di un modello raster di velocità di movimento verticale del suolo e all'elaborazione della carta a curve isocinetiche relativa all'intera area di pianura regionale.

2.2 Dati elaborati

L'elaborazione dei dati radar acquisiti sull'area d'interesse è stata condotta con la tecnica SqueeSAR™, al fine di individuare e localizzare i punti di misura presenti, stimarne le velocità medie annue di spostamento lungo la linea di vista del satellite e le relative serie storiche di spostamento. I dati radar di base sono costituiti da immagini del satellite RADARSAT-1 acquisite in geometria ascendente da tre orbite satellitari parallele, ad eccezione dell'area di Rimini per la quale sono state utilizzate immagini in geometria discendente. Le elaborazioni sono state condotte per sette "siti" (sei con dati ascendenti ed uno con dati discendenti), successivamente allineati tra loro e portati sul sistema geodetico-cartografico UTM-WGS84 (fuso 32).

I punti di misura risultanti da un'analisi SqueeSAR™ sono denominati PS (Permanent Scatterers) e DS (Distributed Scatterers), e per ciascuno di essi vengono fornite la velocità media di spostamento (mm/anno) nel periodo monitorato e la serie storica di spostamento (in mm) lungo la linea di vista del satellite.

Il database complessivo consta di 318.625 punti evidenziati in Figura 1; in tabella 1 si riportano alcuni dati caratteristici dei sette siti processati, la cui copertura è illustrata in figura 2.

⁵ La stazione SBPO di San Benedetto Po, pur essendo stata elaborata, non è stata utilizzata essendo esterna, anche se di poco, rispetto all'area analizzata.

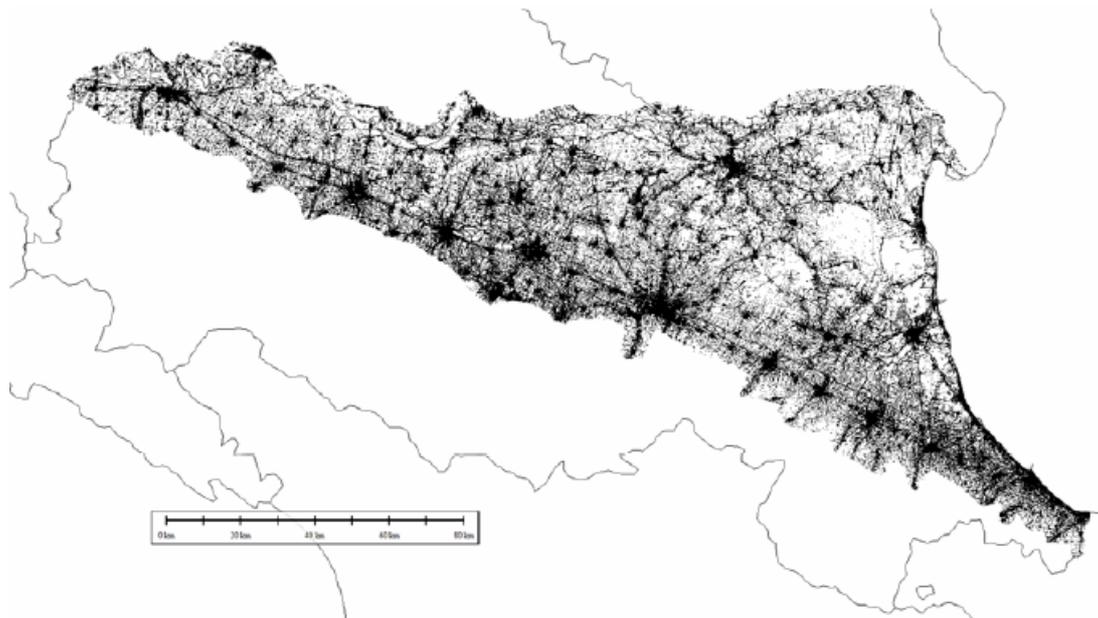


Fig. 1 - Distribuzione dei PS e DS disponibili per l'elaborazione delle carte di velocità di movimento verticale del suolo

Sito	Satellite/geometria	Track	N. immagini	Periodo	Punti	Estensione (km ²)
Ravenna	RSAT1 ascendente	4	65	16/01/2006-15/05/2011	68469	≈2380
Comacchio	RSAT1 ascendente	4	67	16/01/2006-15/05/2011	55024	≈3550
Bologna	RSAT1 ascendente	247	70	09/01/2006-07/05/2011	66640	≈2800
Reggio Emilia	RSAT1 ascendente	247	70	09/01/2006-07/05/2011	71507	≈2290
Fidenza	RSAT1 ascendente	147	68	02/01/2006-30/04/2011	32089	≈1370
Piacenza	RSAT1 ascendente	147	68	02/01/2006-30/04/2011	15436	≈650
Rimini	RSAT1 discendente	154	60	03/01/2006-01/05/2011	9460	≈270

Tab. 1 - Dati caratteristici dei 7 siti elaborati con tecnica SqueeSAR™

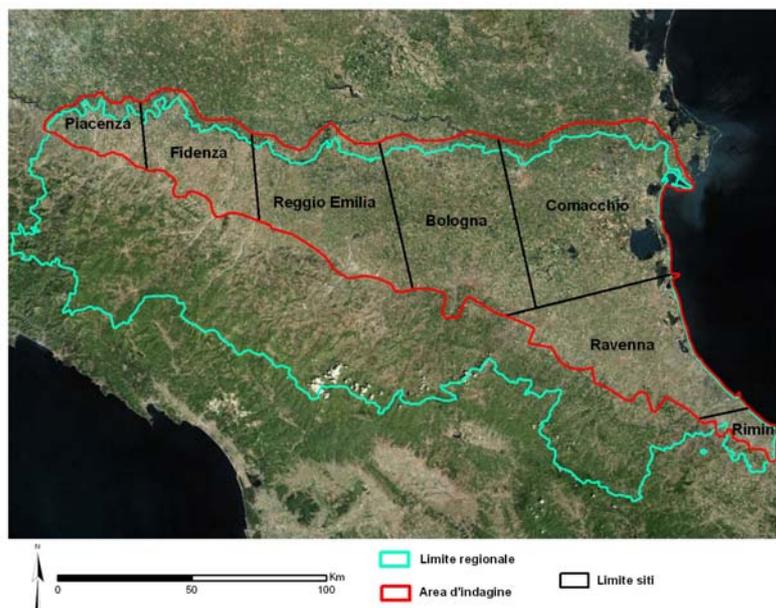


Fig. 2 - Estensione e denominazione dei 7 siti elaborati

Il database contiene per ogni punto un valore di deviazione standard da associare alla velocità calcolata. Nelle Figure 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, e 3.7 si presenta questa informazione per ogni sito, in forma sia di istogramma sia di distribuzione planimetrica mediante classificazione in scala di colori su base GIS. Nelle mappe sono visualizzati i punti di riferimento assunti per le singole zone nel processamento dei dati radar; si ricorda che la deviazione standard associata alla velocità di movimento di un bersaglio radar è legata alla distanza tra il PS/DS ed il punto di riferimento scelto per il sito, alla qualità del punto di misura (coerenza di fase), alla qualità della stima della componente atmosferica.

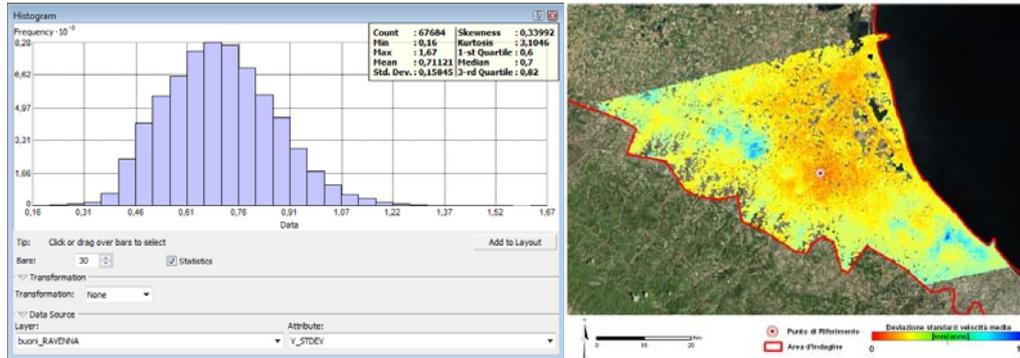


Fig. 3.1 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Ravenna”

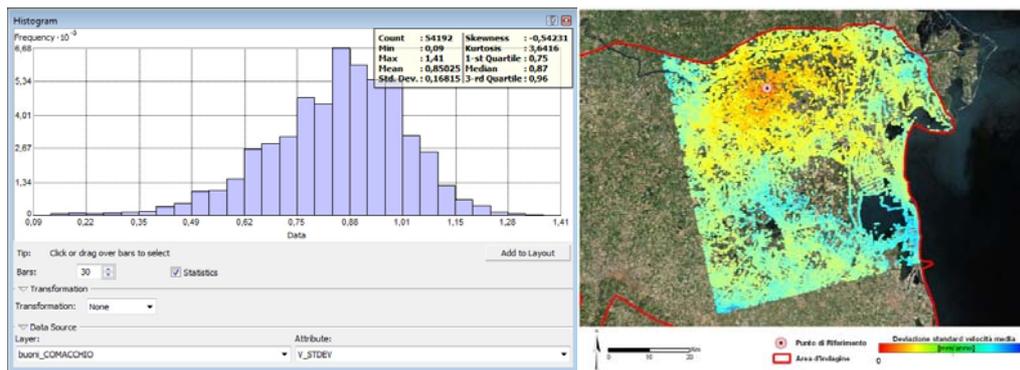


Fig. 3.2 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Comacchio”

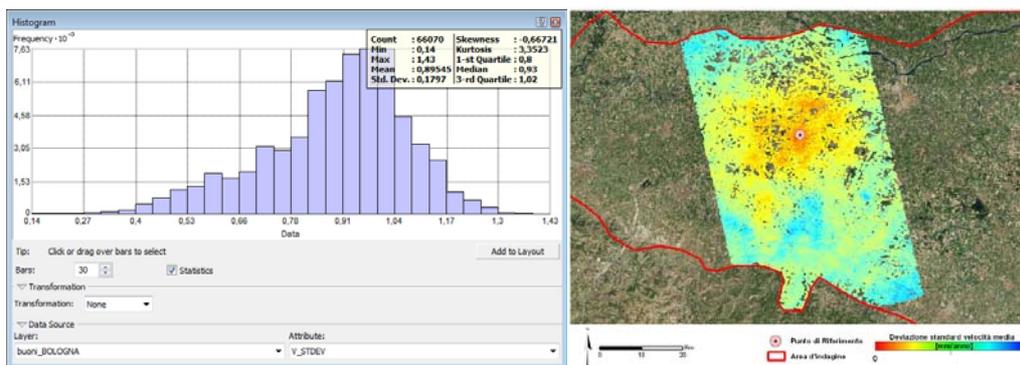


Fig. 3.3 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Bologna”

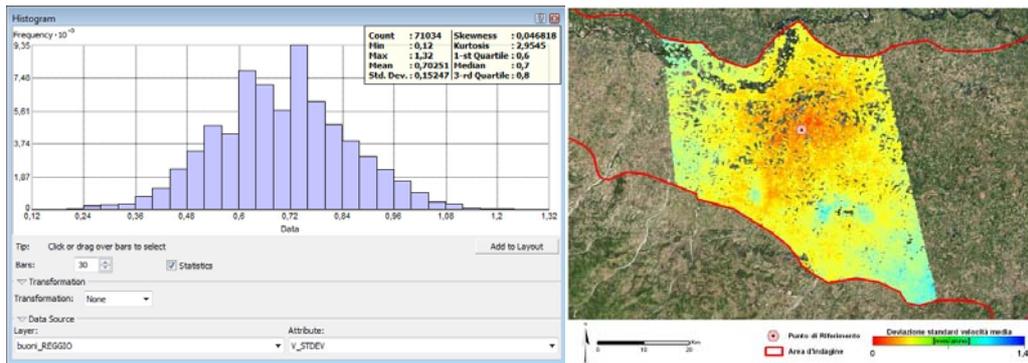


Fig. 3.4 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Reggio Emilia”

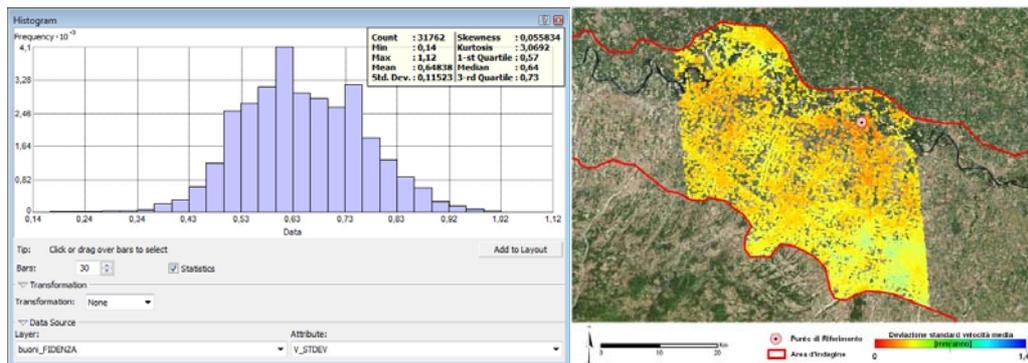


Fig. 3.5 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Fidenza”

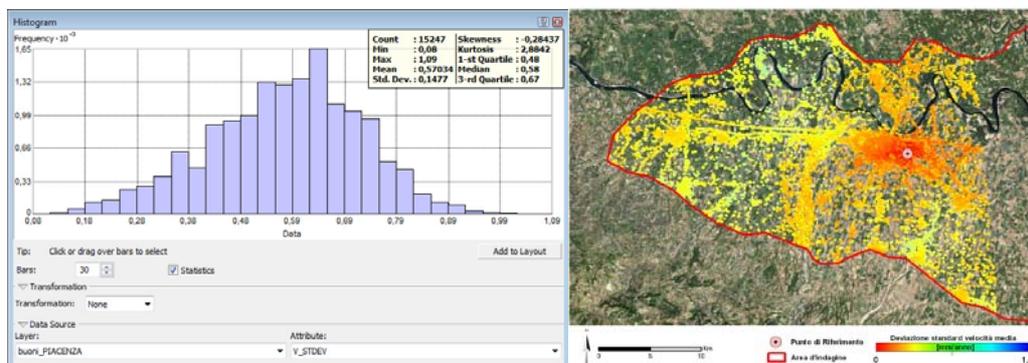


Fig. 3.6 - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Piacenza”

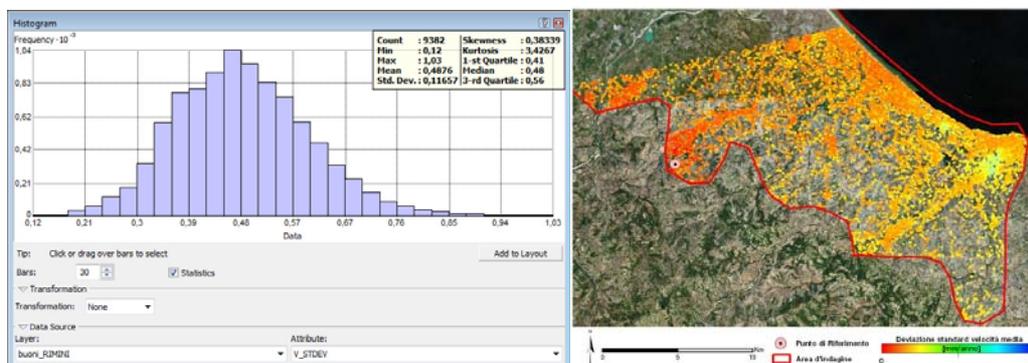


Fig. 3.7 Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dalla tecnica SqueeSAR™: Sito “Rimini”

Sull'intero dataset il valore massimo raggiunto dalla deviazione standard è risultato di 1.4 mm/anno. Si può osservare che si tratta di risultati molto interessanti; rispetto alle precedenti

esperienze condotte con analisi interferometrica sul territorio regionale, i valori massimi di deviazione standard sono dello stesso ordine di quelli ottenuti con dati ERS per il periodo 1992-2000, ma sono nettamente migliori di quelli ottenuti con dati Envisat e RADARSAT per il periodo 2002-2006 (questi ultimi, d'altronde, erano penalizzati da un minor numero di immagini disponibili per il processamento).

Va infine osservato che ai fini di un utilizzo diretto delle velocità per l'analisi della subsidenza, si sono ipotizzati per l'area di indagine movimenti puramente verticali; pertanto i dati di spostamento, forniti lungo la linea di vista del satellite LOS (Line of Sight), sono stati riproiettati lungo la verticale (Figura 4), al fine di un confronto diretto con i dati forniti dalle stazioni permanenti GPS, seguendo lo stesso approccio già verificato sperimentalmente nella elaborazione compiuta nel 2006. La scelta è suffragata dall'analisi dei valori di spostamento orizzontale ottenuti sulle stazioni GPS considerate, che fornisce movimenti intra-placca di entità molto modesta e tale da renderne trascurabile l'influenza sui movimenti verticali⁶.

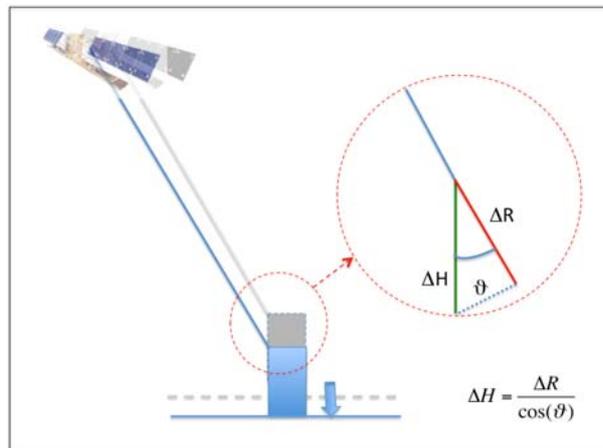


Fig. 4 - Il dato radar: LOS e verticale

2.3 Definizione di un datum di velocità e calibrazione

Come noto, lo studio della subsidenza, al pari di un qualunque fenomeno che debba essere definito rispetto ad un riferimento, convenzionale o di significato fisico, richiede che venga definito un datum a cui le osservazioni verranno riferite. Tale datum può essere definito seguendo criteri geometrici, e in tal caso si presuppone di avere informazioni esterne relative alle coordinate (o alla variazione nelle coordinate) di un numero adeguato di punti, oppure secondo criteri più qualitativi di carattere geologico-geofisico.

Per le reti di livellazione il datum risulta definito dalla quota, o variazione di quota, di uno o più capisaldi interessati dal rilievo; nel caso della rete regionale di monitoraggio della subsidenza, si assunse come stabile per le campagne di livellazione - nei margini dell'errore associato a tali operazioni - un caposaldo posto nel primo appennino bolognese, nei pressi di Sasso Marconi, scelto sulla base di considerazioni geologiche corroborate successivamente da alcune misure esterne (collegamento tramite livellazione all'osservatorio geodetico co-locato GPS-VLBI⁷ di Medicina).

⁶ Nell'ambito dell'elaborazione che fu effettuata per il periodo 2002-2006 infatti, si ebbe la disponibilità, anche se limitata all'area centrale della regione, di un dataset Envisat a doppia geometria (ascendente e discendente) che consentì di valutare come trascurabile, ai fini dello scopo del lavoro, l'entità delle componenti orizzontali Est-Ovest degli spostamenti misurati dai PS (si ricorda che la tecnica SAR non consente di ottenere informazioni nella direzione Nord-Sud).

⁷ Very Long Baseline Interferometry.

Nell'ambito della presente attività, per la quale non sono state previste misure di livellazione, il *datum* è stato definito in modalità assoluta, per quanto possibile allo stato dell'arte, riferendosi ad una rete di 17 stazioni permanenti GPS nell'area di studio (Figura 5), appartenenti a tre diverse infrastrutture geodetiche:

- tre stazioni appartenenti alle reti globali scientifiche IGS-EUREF (rete mondiale e rete europea);
- quattro stazioni appartenenti alla Rete Nazionale Integrata Gps (RING) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, materializzata principalmente per studi di geodinamica attuale;
- dieci stazioni appartenenti alla rete di stazioni permanenti GPS istituita dalla FoGER - Fondazione dei geometri e geometri laureati dell'Emilia-Romagna (ex SoGER) - per scopi tecnici, in particolare, per il posizionamento topografico di precisione in tempo reale.

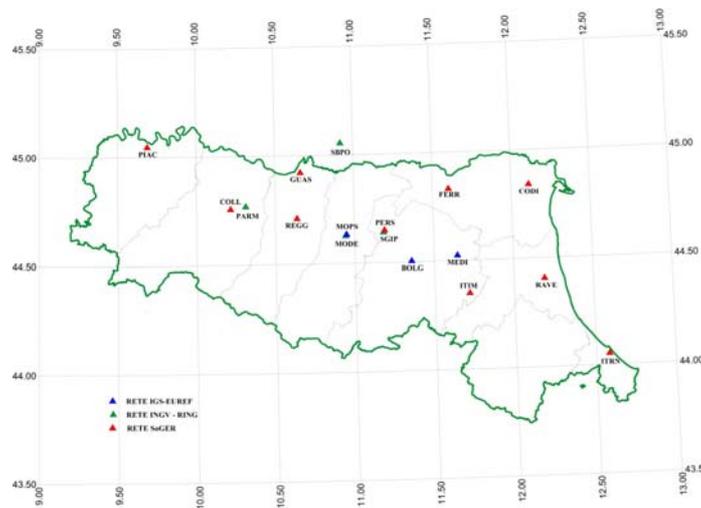


Fig. 5 - Ubicazione delle 17 stazioni permanenti GPS elaborate

I dati (serie storiche di osservazioni con acquisizioni ogni 30" riferite al periodo 2007-2011) sono stati elaborati con procedure specialistiche già descritte nella relazione finale relativa alla Prima fase del presente lavoro (vedi nota 3). Le coordinate di ogni stazione sono state calcolate nel sistema geocentrico ITRF2008 e trasformate nel sistema geodetico locale. Ad ogni stazione permanente è stata dunque associata una velocità media di movimento verticale (mm/anno) nel periodo di studio (le componenti orizzontali sono risultate ridotte, e comunque riconducibili alla velocità di deriva continentale della placca euroasiatica).

Un sottoinsieme di questi punti, in numero di sei (Figura 6), è stato usato per fissare il *datum* dei punti risultanti dall'analisi interferometrica, in una procedura di calibrazione avente lo scopo di rimuovere l'effetto di una componente di velocità di bassa frequenza (un piano) dovuta principalmente ad errori orbitali.



Fig. 6 - Posizione delle sei stazioni permanenti GPS utilizzate in fase di calibrazione

A tal fine è stato effettuato il confronto tra le velocità di movimento verticale fornite dal GPS e quelle desunte dai punti interferometrici più prossimi a ciascuna stazione (le velocità di movimento erano state precedentemente riproiettate dalla LOS alla verticale).

Per effettuare la stima delle differenze è stato dunque necessario definire una corrispondenza tra le stazioni GPS ed i bersagli radar (PS), non essendo generalmente verificato che si riscontri una coincidenza perfetta tra la posizione dell'antenna GPS ed un punto ottenuto dal dato radar. E' stato effettuato il confronto selezionando sul dato SqueeSAR™ **a piena risoluzione** i punti nell'intorno delle stazioni GPS che, per posizione e velocità media nello stesso periodo coperto dalle misure GPS, risultavano più rappresentativi. Le velocità dei punti selezionati (sottoposti ad uno screening preliminare da parte di un operatore) sono state quindi mediate, attribuendo a ciascun punto di misura un peso sulla base della sua coerenza, ed i valori così ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo delle differenze con le misure GPS.

La Figura 7 illustra la situazione sui sei vertici GPS; si può notare che in generale esistono diversi bersagli radar sulla stessa struttura che ospita l'antenna GPS. In tali casi, è sempre opportuno effettuare uno screening diretto dei dati. A titolo di esempio si può notare il caso della stazione GPS di Bologna, per la quale, a seguito di un'analisi specifica, si è scartato un punto con palesi caratteristiche di "outlier", che erano state evidenziate prima per via numerica e grafica e confermate poi da un'analisi visiva del database dei PS/DS su una base ottica ad alta risoluzione. Il grafico in figura 8 riporta le velocità di movimento verticale calcolate lungo sei anni per sei bersagli prossimi alla stazione GPS; si può osservare che l'andamento delle velocità dei PS/DS nel corso del tempo è con buona approssimazione in fase con quanto mostrato dalla stazione GPS; si può osservare che l'andamento delle velocità dei PS/DS nel corso del tempo è con buona approssimazione in fase con quanto mostrato dalla stazione GPS. Valutando il comportamento dei singoli punti si nota che per uno sono presenti valori che si discostano dagli altri in maniera significativa: si tratta del punto di codice A5280 che, ad un'analisi visiva su base ottica ad alta risoluzione, si rivela essere un DS associato ad un'area caratterizzata da vegetazione ad alto fusto.



Fig. 7 - Distribuzione dei punti di misura individuati nell'analisi SqueeSAR™ a piena risoluzione nell'intorno delle 6 stazioni GPS; sono evidenziati in rosso i punti di misura selezionati per il confronto con i dati GPS

CODE *	HEIGHT	H_STDEV	VEL	V_STDEV	COHERENCE	EFF_AREA
A4YYQ	89.92	1.16	-3.52	0.96	0.92	0
A4YYB	80.75	1.15	-3.77	0.94	0.96	0
A52D0	89.22	1.17	-3.76	0.94	0.9	0
A528O	112.09	1.3	-3.46	1.06	0.79	2593
A4YY3	87.54	1.2	-5.63	0.97	0.93	0
A4YW1	88.22	1.15	-5	0.92	0.96	0

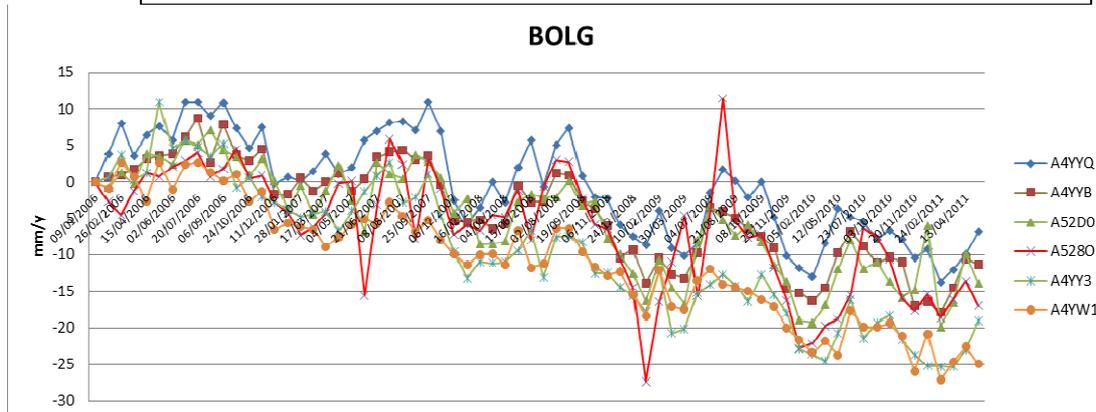


Fig. 8 - In alto: dati relativi ad alcuni PS e DS siti nell'intorno della stazione GPS di Bologna. Al centro: grafico con l'andamento (mm/anno) dei PS e DS dal 2006 al 2011. Sotto: i bersagli considerati e la posizione della stazione permanente GPS

La Figura 9 mostra graficamente l'entità delle differenze calcolate tra le velocità dedotte dall'analisi interferometrica e quelle ottenute dalle serie storiche GPS. Tali differenze sono state successivamente minimizzate con una procedura di calibrazione che è sostanzialmente consistita nella rimozione di una componente di velocità di bassa frequenza dovuta in primo luogo ad errori orbitali (geometricamente si tratta della determinazione ed applicazione di un piano).

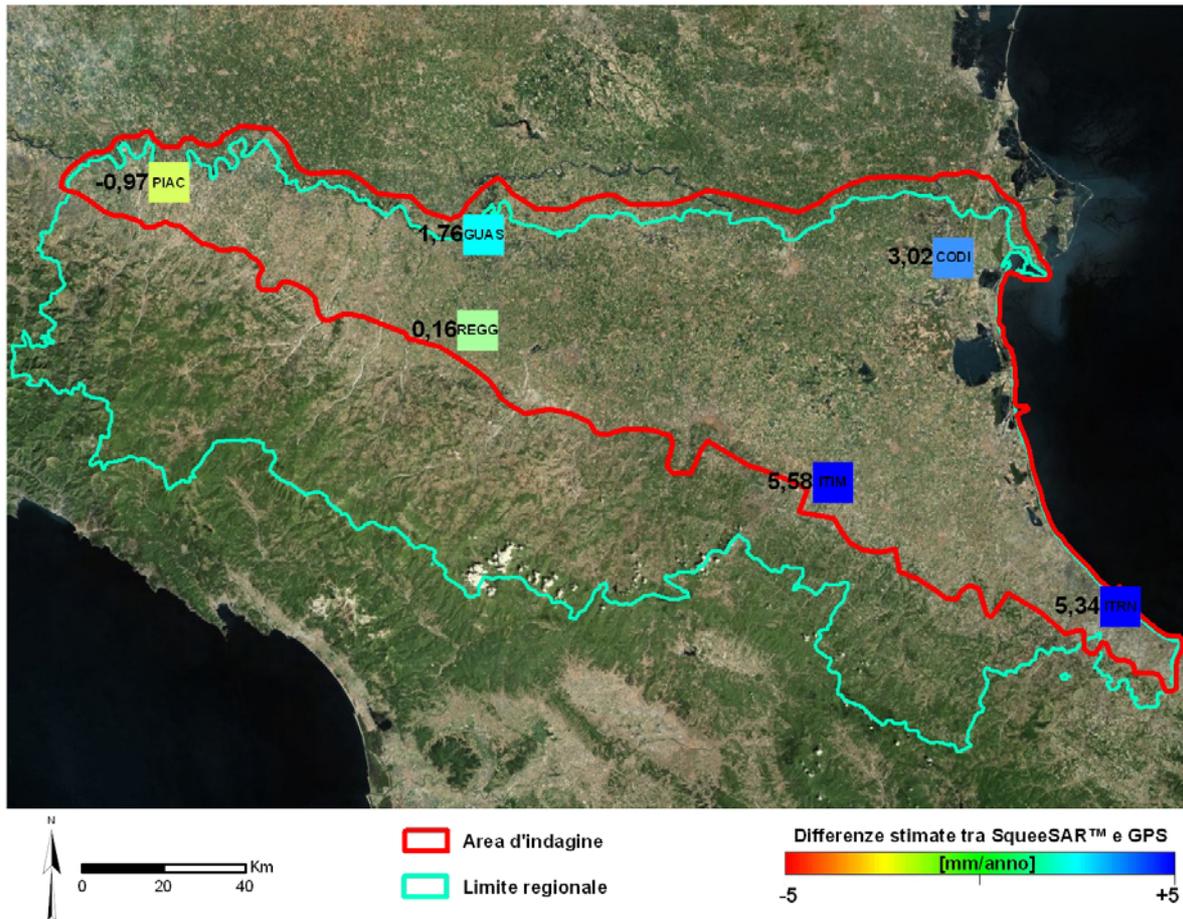


Fig. 9 - Differenze stimate tra i dati SqueeSAR™ e le sei stazioni permanenti GPS; le differenze sono state successivamente minimizzate con l'applicazione di un piano

La Tabella 2 riporta i valori di velocità di movimento verticale misurati con il metodo GPS e quelli desunti dai PS/DS situati nell'intorno dei vertici GPS. L'ultima colonna riporta i valori dei residui dopo avere applicato la calibrazione.

Nome stazione GPS	Velocità GPS (mm/anno)	N° punti	Velocità verticale media (mm/anno)	Velocità verticale massima (mm/anno)	Velocità verticale minima (mm/anno)	Deviazione standard (mm/anno)	Residui post-calibrazione (mm/anno)
CODI	-1.88±0.17	8	1.18	2.5	-0.32	1.12	-0.30
GUAS	-0.09±0.72	8	1.66	2.43	0.76	0.59	+0.83
ITIM	-0.58±0.32	3	4.86	5.8	3.97	0.92	+1.59
ITRN	-1.69±0.31	5	4.1	4.76	2.9	0.75	-0.72
PIAC	1.03±0.66	13	0.14	2.59	-1.7	1.08	-0.12
REGG	-0.83±0.29	7	1.14	1.21	-1.91	1.14	-1.27

Tab. 2 - Valori di movimento verticali misurati con il metodo GPS e quelli desunti dai PS+DS situati nell'intorno dei vertici GPS

In questo modo le velocità medie di deformazione dei dati SqueeSAR™ sono state riferite al sistema di riferimento assoluto realizzato dalle stazioni GPS; va notato tuttavia che le serie storiche associate ai singoli PS e DS rimangono ancora riferite ai punti di riferimento locali dei siti rispetto ai quali è stata realizzata l'analisi interferometrica.

Successivamente, sono state utilizzate le velocità di movimento verticale di ulteriori 10 stazioni GPS con la funzione di *check points* rispetto al risultato della calibrazione. La verifica è stata effettuata anche in questo caso sui dati a piena risoluzione e considerando le velocità dei punti ricalcolate in sovrapposizione al periodo di misura delle stazioni GPS. I risultati per i 16 punti che ricadono nella regione (6 usati per la calibrazione, 10 come *check points*) sono illustrati in Tabella 3, che per ogni stazione riporta la velocità di movimento dedotta con GPS, il numero di bersagli radar considerati nell'intorno della posizione dell'antenna, la velocità derivata dalla media pesata di tali punti per il periodo considerato (il peso è legato alla coerenza del singolo bersaglio), la deviazione standard della velocità per tale insieme di punti, la distanza media dall'antenna GPS, l'entità dei residui post-calibrazione (alle velocità dei bersagli nel periodo è stata sottratta la velocità del GPS).

Nome stazione GPS	Velocità GPS (mm/anno)	N° punti	Velocità SAR (mm/anno)	Deviazione standard (mm/anno)	Distanza media (m)	Residui post-calibrazione (mm/anno)
CODI	-1.88±0.17	8	-2.18	1,12	31	-0.30
GUAS	-0.09±0.72	8	0.74	0.59	20	0.83
ITIM	-0.58±0.32	3	1.01	0.92	7	1.59
ITRN	-1.69±0.31	5	-2.41	0.75	22	-0.72
PIAC	1.03±0.66	13	0.90	1.08	38	-0.12
REGG	-0.83±0.29	7	-2.10	1.13	20	-1.27
BOLG	-2.34±1.83	7	-4.25	1.17	30	-1.91
MEDI	-1.28±0.21	5	-1.82	0.93	67	-0.54
MOPS	-1.69±1.72	9	-2.19	0.70	70	-0.50
MODE	-3.58±1.95	7	-3.15	0.75	13	0.42
PARM	2.95±0.44	19	0.65	0.78	50	-2.29
SGIP	-4.96±0.25	18	-5.74	0.73	88	-0.78
COLL	0.48±0.50	4	1.25	0.57	8	0.77
FERR	0.92±0.24	9	-2.54	0.83	18	-3.46
PERS	-8.08±0.36	15	-7.45	0.79	28	1.34
RAVE	-4.78±0.37	15	-3.57	0.77	32	1.12

Tab. 3 - Risultati del confronto tra le velocità di movimento verticale determinate con analisi interferometrica e con misure GPS per le 16 stazioni permanenti considerate

Il residuo medio è pari a -0.36 mm/anno, con una deviazione standard di 1.39 mm/anno (volendo considerare i soli 10 *check points* i valori sono rispettivamente -0.58 mm/anno e 1.58). Le sole stazioni di Parma e Ferrara presentano valori abbastanza difforni nei due dataset.

Si è poi voluto verificare se all'interno del dettaglio dello stesso fabbricato, sede di installazione della stazione permanente GPS, ci fossero informazioni sufficienti per

avvicinarsi ulteriormente al punto di misura GPS, al fine di isolare eventuali piccoli movimenti differenziali locali. La stessa operazione è stata, quindi, eseguita selezionando in ambiente GIS il solo bersaglio PS più prossimo a ciascuna stazione GPS.

Codice stazione GPS	Velocità (mm/anno)	Deviazione standard	Codice PS	Velocità (mm/anno)	Deviazione standard	Velocità PS-velocità GPS (mm/anno)	Distanza PS-GPS (m)
BOLG	-2,34	1,83	A4YYJ	-3,99	0,74	-1,65	5,32
CODI	-1,88	0,18	A4YIB	-1,30	0,86	0,58	17,07
COLL	0,48	0,50	A1CVO	1,48	0,88	1,00	5,91
FERR	0,92	0,24	A5ZC8	-1,06	0,86	-1,98	7,05
GUAS	-0,09	0,57	ABV12	-0,42	0,52	-0,33	7,32
ITIM	-0,58	0,29	A7T1H	-0,17	0,75	0,41	3,78
ITRN	-1,69	0,33	A0ATY	-2,37	0,84	-0,68	1,69
MEDI	-1,28	0,21	A20PO	-3,20	1,02	-1,92	18,10
MODE	-1,69	1,72	A3K4E	-3,20	0,64	-1,51	2,16
MOPS	-1,69	1,72	A3K4W	-2,18	0,62	-0,49	10,12
PARM	2,95	0,44	A1BWU	0,56	0,96	-2,39	23,48
PERS	-8,08	0,36	A9V0S	-6,74	0,72	1,34	14,82
PIAC	1,03	0,66	A5MPR	-0,04	0,29	-1,07	10,03
RAVE	-4,78	0,37	A7MGE	-4,14	0,53	0,64	10,43
REGG	-0,83	0,35	A6X22	-2,55	0,57	-1,72	7,48
SGIP	-4,96	0,25	A9O35	-5,73	0,73	-0,77	26,17

Tab. 4 - Confronto tra le velocità (mm/anno) calcolate alle stazioni permanenti GPS e quelle derivate dall'analisi interferometrica per il PS più prossimo

Dai valori di Tabella 4 risulta che la distanza media tra una stazione GPS ed il PS più prossimo è di 10.6 m e la differenza media tra le velocità fornite da GPS e quelle fornite dai PS è di -0.66 mm/anno, con una deviazione standard di 1.17 mm/anno. Considerando le sole 10 stazioni usate come check points i precedenti valori non si modificano in modo significativo (-0.77 mm/anno e 1.35 mm/anno).

Pur essendo il campione esaminato ristretto dal punto di vista numerico (ma d'altra parte si tratta comunque di ben 16 stazioni permanenti GPS), si può concludere che i valori ottenuti possono essere considerati del tutto soddisfacenti in una procedura di validazione della metodologia.

Nel confronto complessivo tra velocità derivate dal GPS e dal SAR, si può osservare che la deviazione standard per il dataset SAR è quasi perfettamente sovrapponibile all'entità dei residui rispetto alle corrispondenti velocità derivate dal GPS. A loro volta le velocità GPS, se si escludono le stazioni di Bologna e di Modena (BOLG, MODE e MOPS) che presentano nella componente verticale movimenti locali non lineari, mostrano deviazioni standard ampiamente inferiori al mm/anno (vedi Tabella 4). Pertanto, volendo attribuire una soglia d'incertezza complessiva dell'intera analisi effettuata, si ritiene che possa essere considerato, in via cautelativa, il valore di circa ± 2 mm/anno. Per tale motivo, si è scelto di tracciare le curve isocinetiche nella carta finale con passo di 2.5 mm/anno. Secondo questi criteri, il dataset prodotto dall'analisi interferometrica può dunque ritenersi validato.

2.4 Verifica e validazione dei bersagli radar

L'elaborazione di una carta dei movimenti verticali del suolo tramite una rappresentazione ad isolinee, comporta inevitabilmente un'interpretazione dei dati di partenza e tale interpretazione comincia già prima della scelta dei metodi di rappresentazione: è necessario innanzitutto valutare quali dati ci interessa rappresentare e, quindi, quali risulterebbero fuorvianti ai fini della tematica che vogliamo evidenziare.

Prima dell'avvento del metodo dell'analisi interferometrica di dati satellitari, una carta dei movimenti poteva basarsi su un numero relativamente limitato di punti, in particolare si

faceva affidamento a capisaldi di livellazione, opportunamente materializzati su strutture esistenti o, in assenza di queste, procedendo a realizzare pilastrini *ad hoc* come supporto al contrassegno. La rete regionale di monitoraggio della subsidenza misurata nel 1999 era costituita da oltre 2300 capisaldi di livellazione, in parte preesistenti alla rete stessa in quanto appartenenti a reti storiche e, in parte, istituiti *ex novo* al fine di ottenere una distribuzione il più possibile uniforme dell'informazione. La distanza tra due capisaldi si aggirava mediamente intorno al chilometro; lungo l'arco costiero tale distanza poteva essere più ridotta. La prima carta dei movimenti verticali del suolo a scala regionale (2001) è stata costruita tramite le differenze di quota, ovvero i dislivelli, risultanti dal confronto tra il rilievo del 1999 e i rilievi precedenti realizzati da Enti diversi ciascuno sui territori di propria competenza (Istituto Geografico Militare Italiano, Comuni, Consorzi di Bonifica ecc.). Tale confronto è stato possibile solo su un migliaio circa di capisaldi di livellazione, risultanti da un'accurata selezione: si è cercato di escludere, per quanto possibile, capisaldi che presentassero andamenti particolarmente anomali rispetto a quelli contigui, con l'obiettivo di osservare movimenti legati alla superficie del terreno e non movimenti specifici della struttura sulla quale era ancorato il contrassegno (cedimenti strutturali, manomissioni ecc.).

L'analisi interferometrica di dati satellitari supportata da stazioni permanenti GPS, mette a disposizione una quantità di dati di due ordini di grandezza superiore rispetto a quella fornita da una rete di livellazione, cionondimeno permane la necessità di capire quale tipo di movimenti stiamo osservando. Così, come già fatto per il metodo della livellazione, si rende indispensabile selezionare i dati che non ci interessa rappresentare, ovvero che sono fuorvianti rispetto alle finalità del nostro lavoro: rappresentare il fenomeno della subsidenza a scala regionale.

La selezione di PS/DS presenta problematiche sicuramente maggiori rispetto a quelle legate alla selezione di capisaldi di livellazione sia per la quantità di dati da trattare sia per le diverse casistiche che il dato interferometrico può presentare, in particolare dopo l'introduzione del nuovo algoritmo SqueeSARTM. Quest'ultimo, infatti, può associare una velocità di movimento al baricentro elettromagnetico (DS) di un'area di cui è nota la superficie (ma non il perimetro) essendo costituita da un insieme di pixel aventi caratteristiche pressoché identiche del segnale radar riflesso. In questo modo ci si trova di fronte ad un dato concettualmente diverso rispetto al PS, il quale, essendo un bersaglio puntiforme, caratterizzato da un solo pixel e legato ad una struttura esistente è, in qualche modo, equiparabile ad un caposaldo di livellazione. Pur nella sua ambiguità spaziale il DS costituisce un'informazione preziosa laddove l'assenza di strutture riflettenti il segnale radar, in passato, si traduceva in assenza di dati.

Sono state implementate quindi procedure volte alla ricerca di punti (*outlier*) caratterizzati da velocità "anomale" rispetto al loro intorno⁸, indicativi di fenomeni diversi non attinenti al fenomeno della subsidenza a carattere regionale oggetto del nostro studio, e quindi tali da portare ad un degrado nella mappatura del fenomeno globale. Queste "anomalie", come si vedrà nel seguito, possono evidenziarsi con movimenti estremamente localizzati legati a cedimenti di singole strutture, all'assestamento di opere di recente costruzione oppure in taluni casi, specialmente in aree agricole, essere riconducibili a variazioni di umidità del terreno che comportano sfasamenti nel segnale SAR erroneamente identificati come movimento.

Si tratta di un processo importante e al tempo stesso delicato, che deve essere condotto con metodi oggettivi su base statistica, vista l'entità dei dati da trattare, ma che deve essere anche

⁸ Il comportamento "anomalo" di un punto viene qui inteso come una correlazione spaziale nulla o pressoché nulla rispetto ai bersagli radar nell'intorno geografico, con un valore che palesemente non è associabile al fenomeno oggetto del nostro studio.

accompagnato e suffragato da valutazioni specifiche supportate da un'analisi visiva dell'operatore.

Il dataset esaminato conta 318.625 punti suddivisi in 7 siti (Tabella 5): tutti i dati sono stati acquisiti in orbita ascendente (ASCE) tranne per il sito di Rimini acquisito in orbita discendente (DESCE).

N.	SITO	PUNTI
1	Piacenza	15.436
2	Fidenza	32.089
3	Reggio	71.507
4	Bologna	66.640
5	Ravenna	68.469
6	Comacchio	55.024
7	Rimini	9.460
	TOTALE	318.625

Tab. 5 - Bersagli radar presenti nei 7 siti.

Di ogni sito elaborato sono stati forniti due file in formato shape, con estensione rispettivamente .REF e .TSR. Il primo contiene la sola posizione del punto di riferimento nell'analisi, mentre il secondo contiene le informazioni di velocità (VEL: mm/anno), quota (HEIGHT: m), serie storiche e parametri di qualità di tutti i PS e DS individuati nell'analisi: tra questi la deviazione standard è calcolata rispetto al punto di riferimento locale (REF) ed aumenta con la distanza fisica tra il punto di riferimento e il PS o DS considerato. È compresa per tutti i siti entro 1,4 mm/anno.

La caratterizzazione dei bersagli a seguito di un'analisi SqueeSAR™ avviene, come già ricordato, secondo due categorie:

- *Permanent Scatterers* (PS): singoli punti riflettori normalmente posti su strutture stabili come edifici, rocce esposte e altri rilevati.
- *Distributed Scatterers* (DS): bersagli radar distribuiti, ovvero aree irregolari come campi non coltivati, aree detritiche o desertiche non sabbiose rilevate tramite la tecnica SqueeSAR™; 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). Come detto, si tratta però di un dato importante e prezioso in quanto sovente viene a portare indicazione in aree nelle quali non sarebbe stata rilevata la presenza di PS e che dunque sarebbero rimaste prive di informazione.

All'interno della tabella attributi di ogni file, il parametro EFF_AREA permette di distinguere PS e DS: per i primi, il valore di tale attributo è pari a 0 mentre per i secondi il valore del parametro indica l'estensione dell'area associata a ciascun punto, in metri quadrati.

Per isolare gli *outlier* nel dataset si è ricercata una procedura automatica con il principio di confrontare per ogni punto la velocità di spostamento misurata con la velocità di spostamento predetta, stimata utilizzando i dati nell'intorno del punto stesso. Si è adottata quindi una tecnica di Cross-Validation che rimuove dal database delle velocità di movimento un punto per volta e ne predice il valore utilizzando i rimanenti punti adiacenti, selezionati in base ai parametri definiti dall'utente. Il valore predetto (*Predicted*) ed il valore misurato (*Measured*) vengono quindi confrontati, e la procedura è ripetuta per tutti i punti del dataset.

Per la determinazione con approccio geostatistico del valore predetto viene utilizzato il Kriging, un interpolatore esatto per la stima ottimale di una grandezza distribuita nello spazio;

insieme alla stima dei valori interpolati si viene a disporre in questo modo di un'informazione sull'affidabilità per ogni valore. La procedura di Cross Validation ha dunque rimosso uno ad uno i punti misurati e ne ha ri-stimato con kriging il valore alla medesima posizione sfruttando i dati adiacenti: si è ottenuto così un nuovo dato, definito "Error", pari alla differenza tra il valore predetto e il valore misurato (VEL) della velocità di spostamento (figura 10). E' stato poi verificato che il valore atteso di "Error" fosse nullo al fine di confermare l'ipotesi di stazionarietà, necessaria per l'analisi tramite Kriging.

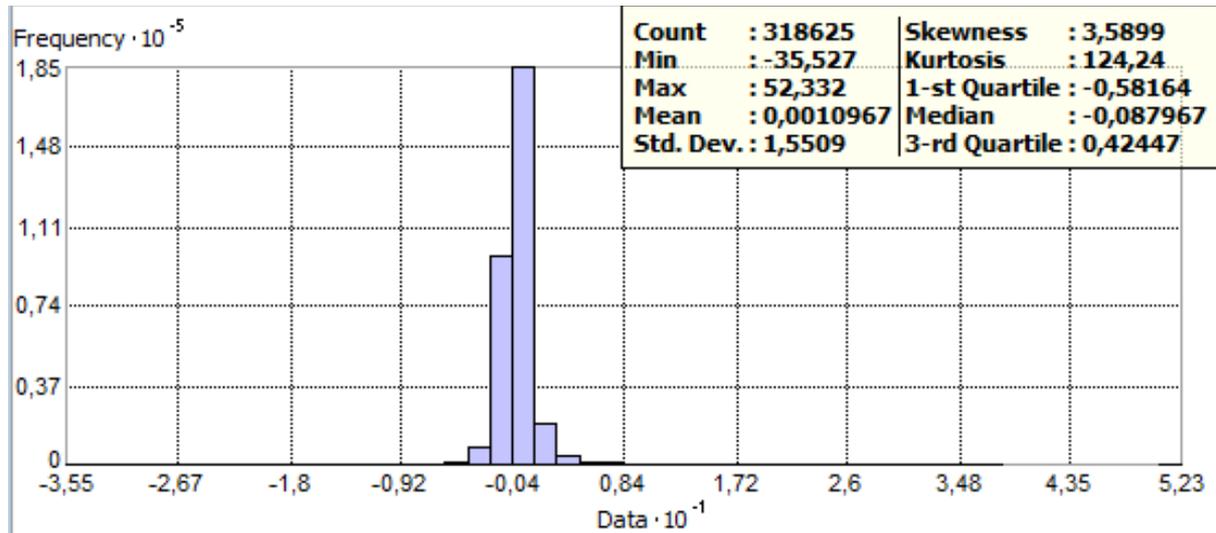


Fig. 10 - Distribuzione in forma di istogramma della variabile "Error"

La diversa natura dei PS e dei DS ha richiesto un'indagine preliminare, al fine di verificare se il loro comportamento, nell'ambito e ai fini della procedura di verifica qui riportata, fosse difforme e richiedesse dunque un trattamento separato. In una prima fase, Kriging e Cross-Validation sono stati dunque applicati separatamente a PS e a DS; successivamente si è ripetuta l'elaborazione analizzando l'intero dataset comprendente entrambe le tipologie di bersagli. Il numero di *outlier* identificati nelle due diverse ipotesi è risultato simile, e si è scelto di proseguire elaborando l'intero set di dati (PS+DS). Si è inoltre scelto di analizzare in blocco tutti i 7 siti a disposizione per avere una mappa unita e coerente dell'intera regione.

Il set di dati (PS+DS) è stato quindi sottoposto a Ordinary Kriging (si è usata la procedura di analisi geostatistica implementata in ESRI ArcGIS). Si è proceduto iterativamente in step successivi, selezionando ogni volta i punti caratterizzati da un valore di "Std Error" (deviazione standard del parametro "Error") oltre la soglia di 5σ . I punti così individuati vengono etichettati come *outlier*, mentre i restanti vengono inviati allo step successivo.

L'analisi tramite Kriging richiede l'elaborazione del variogramma sperimentale sul quale scegliere il modello del variogramma necessario per assegnare i pesi ai punti misurati. Per tale procedura sono stati scelti alcuni parametri: il modello adottato è stato lo "Stable" con Parametro pari a 2, corrispondente ad un modello Gaussiano. Si è impostato a 200 m il "Lag Size" e pari a 12 il numero di Lag, al fine di ottenere un "Major Range" pari a 2.400 m, distanza alla quale in questo caso le osservazioni non vengono più considerate correlate. Per contemplare problemi di eventuali distribuzioni non omogenee nei punti, all'interno di un raggio di cattura pari a 2400 m si sono impostati 4 settori di ricerca, nei quali individuare un minimo di 2 ed un massimo di 5 punti. In zone a bassa densità di bersagli radar, ove non sia possibile quindi raggiungere i requisiti minimi richiesti, l'algoritmo si spinge anche all'esterno dei settori di cattura. Con riferimento alla Figura 11, ai punti più vicini -

evidenziati in rosso - viene assegnato un peso maggiore rispetto ai punti più lontani evidenziati in tonalità di verde.

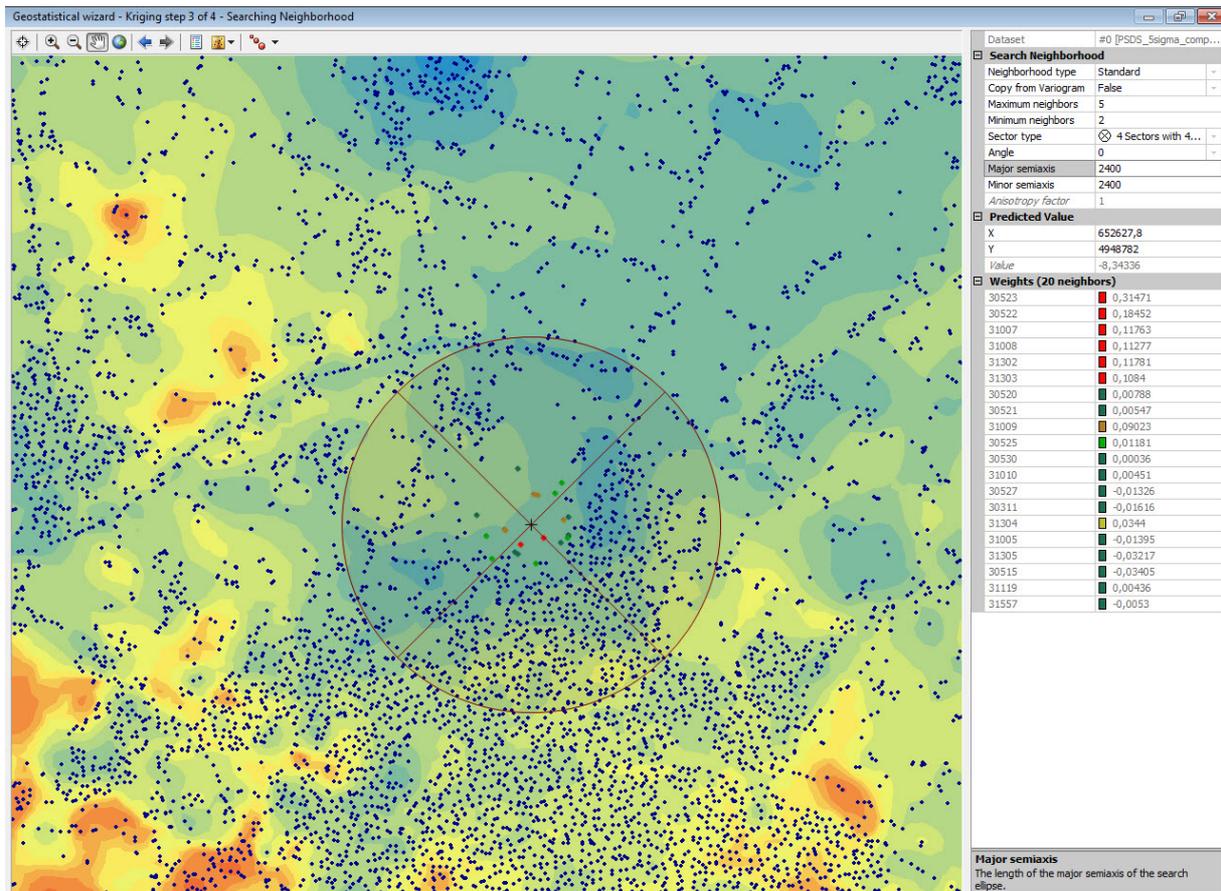


Fig. 11 - Visualizzazione di esempio dei settori di cattura.

Con i successivi step di analisi il dataset viene man mano “ripulito” dagli *outlier* e il dato predetto risulta sempre più aderente al dato misurato.

I risultati di tale confronto possono essere visualizzati graficamente mediante *scatterplot* (scatterogramma o grafico a dispersione, in cui due variabili sono riportate su uno spazio cartesiano - Figura 12), dove in ascissa sono riportati i valori misurati (*Measured*) e in ordinata i valori stimati (*Predicted*). Nello *scatterplot*, la retta disegnata in blu è detta retta di regressione ed esprime la correlazione tra valori misurati e quelli stimati (la sua equazione è fornita al di sotto del grafico); nel caso di ottima corrispondenza tra dato misurato e dato stimato essa dovrebbe essere prossima alla retta con pendenza 1:1 (disegnata in nero).

Si è deciso di terminare l’analisi al terzo step, avendo raggiunto un valore di “Error” di ± 5 mm/anno.

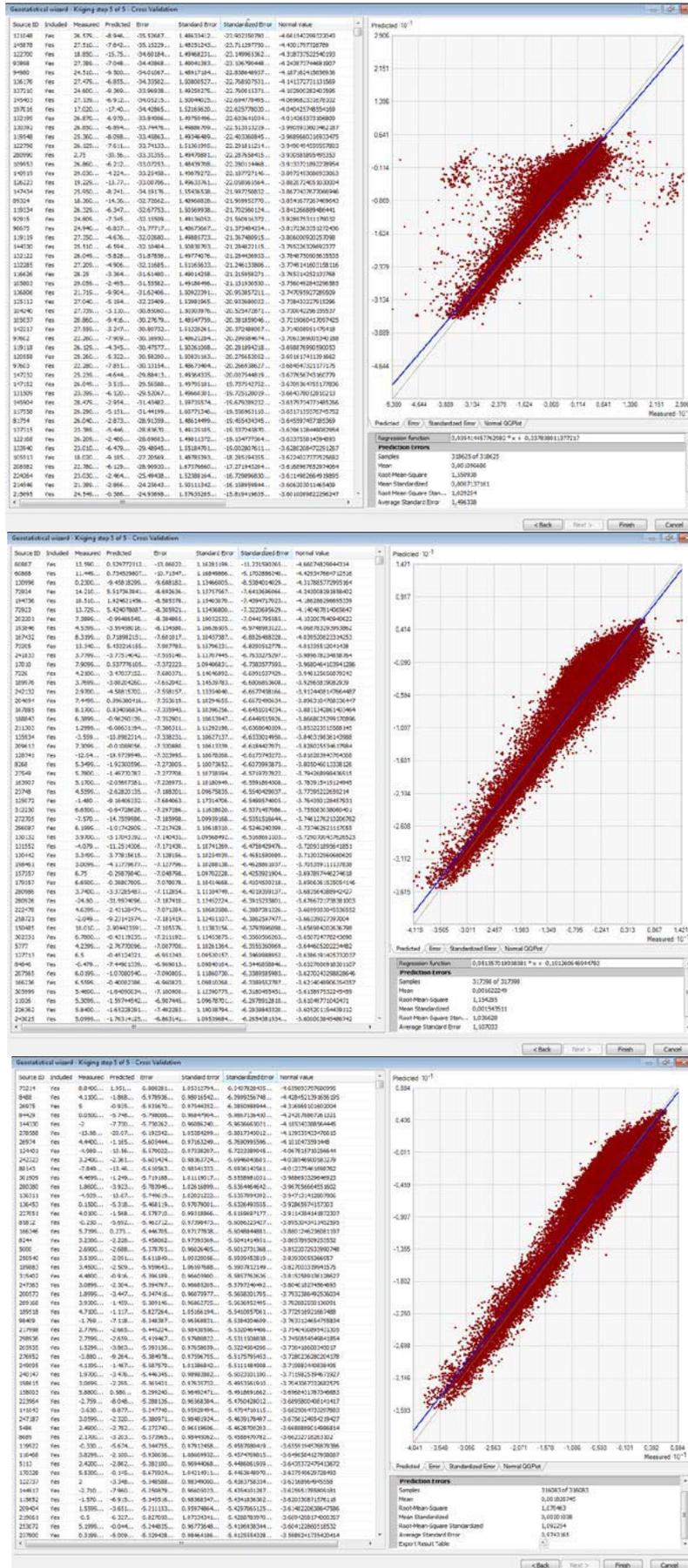


Fig. 12 - Parametri statistici associati ad ogni fase dell'analisi di cross-validazione.

L'analisi definitiva ha quindi identificato 3.543 punti come *outlier*, pari all'1,1% dell'intero dataset, come riportato in Tabella 6, in cui compaiono per ogni step i seguenti parametri:

- **RANGE**: soglia di selezione dei punti da etichettare come “outlier”, sempre pari a 5σ per tutti gli step;
- **ERROR**: residuo corrispondente in ogni step alla soglia $\pm 5\sigma$;
- **PS+DS**: i punti analizzati nell'iterazione corrente;
- **OUT**: i punti oltre la soglia $\pm 5\sigma$ etichettati “outlier”, successivamente suddivisi in PS e DS;
- **%**: percentuale di “outlier” rispetto ai punti analizzati;

STEP	RANGE	ERROR	PS+DS	OUT	%	PS	DS
1	± 5 sigma	$\pm 7,5$	318.625	1.227	0,4	579	648
2	± 5 sigma	$\pm 5,5$	317.398	1.315	0,8	807	508
3	± 5 sigma	± 5	316.083	1.001	1,1	643	358
TOTALE			315.082	3.543	1,1	2.029 (0,6%)	1.514 (0,5%)

Tab. 6 - Parametri statistici associati ad ogni fase dell'analisi di cross validation

In Figura 13, a titolo esemplificativo, si riporta l'immagine relativa ad un *outlier*.



Fig. 13 - Esempio di outlier

Terminata la ricerca automatica, i 3 shapefile di punti candidati outlier, ottenuti nei rispettivi step dell'analisi di cross-validation sono stati uniti in ambiente ArcGIS in un unico file (3.543 punti), da sottoporre ad ulteriori verifiche al fine di risolvere alcuni problemi a livello locale come la perdita di informazione in zone a bassa densità di dati oppure la presenza di raggruppamenti di outlier che evidenziassero particolari fenomeni circoscritti.

Al fine di evidenziare eventuali outlier isolati - per non perdere informazioni in zone con bassa densità di misure - intorno a ciascun outlier è stato creato un buffer di raggio 500 m, all'interno del quale sono stati contati i punti “accettabili” (non outlier); sono stati definiti “outlier isolati” quei punti che, nell'intorno di 500 m, hanno meno di 5 punti “accettabili”. Sono stati così selezionati 287 outlier, 70 dei quali però ricadono al di fuori dell'area delimitata dal confine regionale e della linea di quota dei 100 m s.l.m.; il subset da ricontrollare comprendeva quindi 217 punti. Di ognuno di tali punti è stata redatta una monografia con l'ausilio delle immagini satellitari di Microsoft Virtual Earth, al fine di consentire un agevole controllo visivo. Nel caso di più outlier vicini tra loro, le relative serie

temporali sono rappresentate sovrapposte nello stesso grafico per consentire un confronto immediato dei diversi comportamenti. In generale, vi sono punti (PS) legati al movimento di singole strutture, oppure ricadenti su aree agricole (Figura 14) o specchi d'acqua (Figura 15). Al termine di un'analisi condotta in modo puntuale su ciascuno di questi potenziali "outlier isolati", sono stati reinseriti nell'archivio 29 punti. Con la stessa area di cattura considerata nell'analisi precedente si sono voluti poi evidenziare "gruppi di outlier", sintomo di fenomeni locali da non trascurare. Sono quindi stati selezionati i casi in cui, nel raggio di 500 m definito dal buffer, erano presenti più di 5 outlier. Tra tutti i cluster così identificati sono stati reinseriti nel dataset, al termine di un'attenta analisi, 260 punti.

Il comportamento anomalo di questi piccoli cluster di punti, (PS o DS) può derivare, in generale, dall'asestamento di opere di recente costruzione: svincoli autostradali, rilevati stradali e ferroviari, nuove infrastrutture (Figura 16) e urbanizzazioni o ancora da DS (singoli o raggruppati) posizionati in aree agricole (Figura 17 e Figura 18), in cui variazioni di umidità del terreno possono comportare sfasamenti nel segnale SAR che non devono essere letti come movimento del suolo; in generale, si tratta di una casistica variegata, non pertinente con l'obiettivo specifico del presente lavoro.

In Tabella 7 si riassumono i risultati ottenuti, suddivisi per sito.

ID	Siti	Punti iniziali	Outlier iniziali	Outlier isolati		Outlier isolati all'interno dell'area d'indagine		Cluster			Punti finali	Outlier finali	Outlier recuperati
1	Piacenza	15.436	190	19	10%	17	9%	Reimmessi	Identificazione di raggruppamenti di outlier	Reimmessi	15.247	189	1
2	Fidenza	32.089	327	29	9%	15	5%				31.762	327	0
3	Reggio	71.507	544	22	4%	16	3%				71.034	473	71
4	Bologna	66.640	690	37	5%	32	5%				66.070	570	120
5	Ravenna	68.469	854	54	6%	29	3%				67.684	785	69
6	Comacchio	55.024	860	123	14%	106	12%				54.192	832	28
7	Rimini	9.460	78	3	4%	2	3%				9.382	78	0
		318.625	3.543	287	8%	217	6%	29		260	315.371	3.254	289

Tab. 7 - Risultati dell'analisi su punti outlier e relativi cluster

Il numero dei punti che sono stati utilizzati per la realizzazione della carta dei movimenti verticali del suolo risulta pari a 315.371 essendo stati scartati 3.254 punti. Questi ultimi, potrebbero comunque essere utilizzati per finalità diverse da quelle che hanno informato questo lavoro.

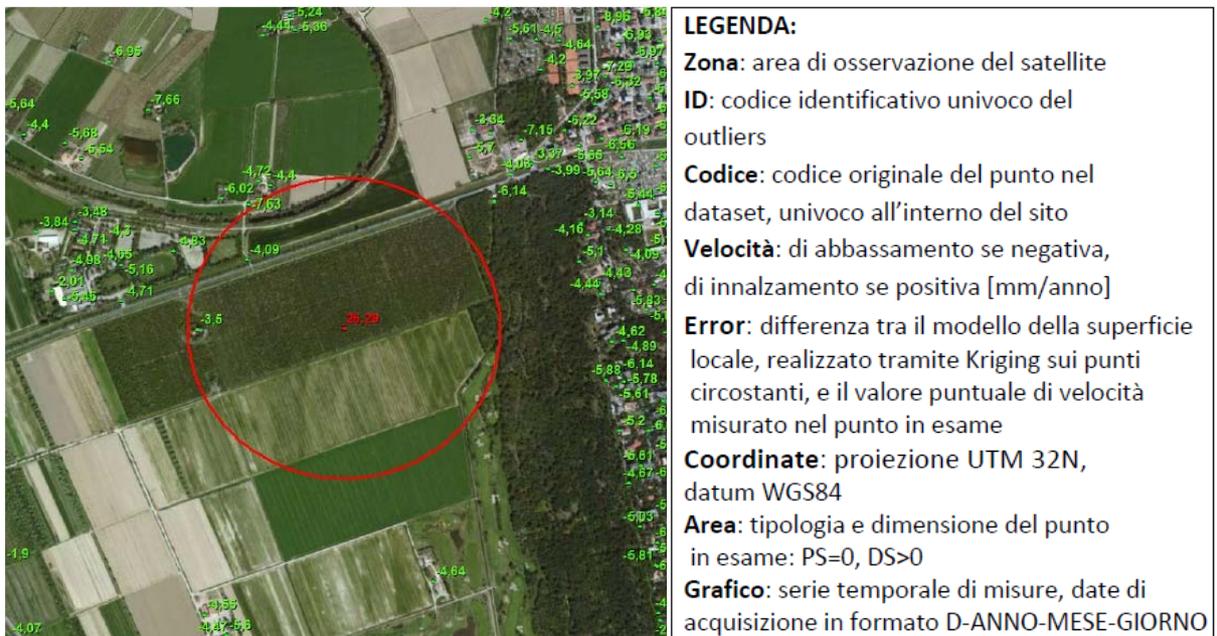
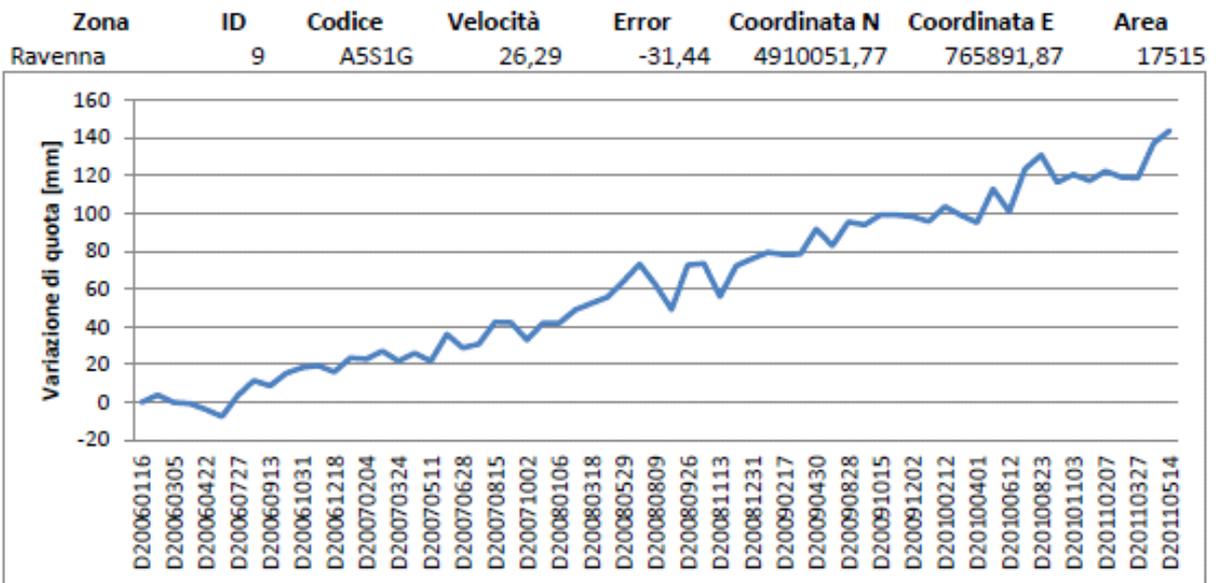


Fig. 14 - Esempio di monografia di un "outlier isolato"(DS) ricadente su un'area agricola

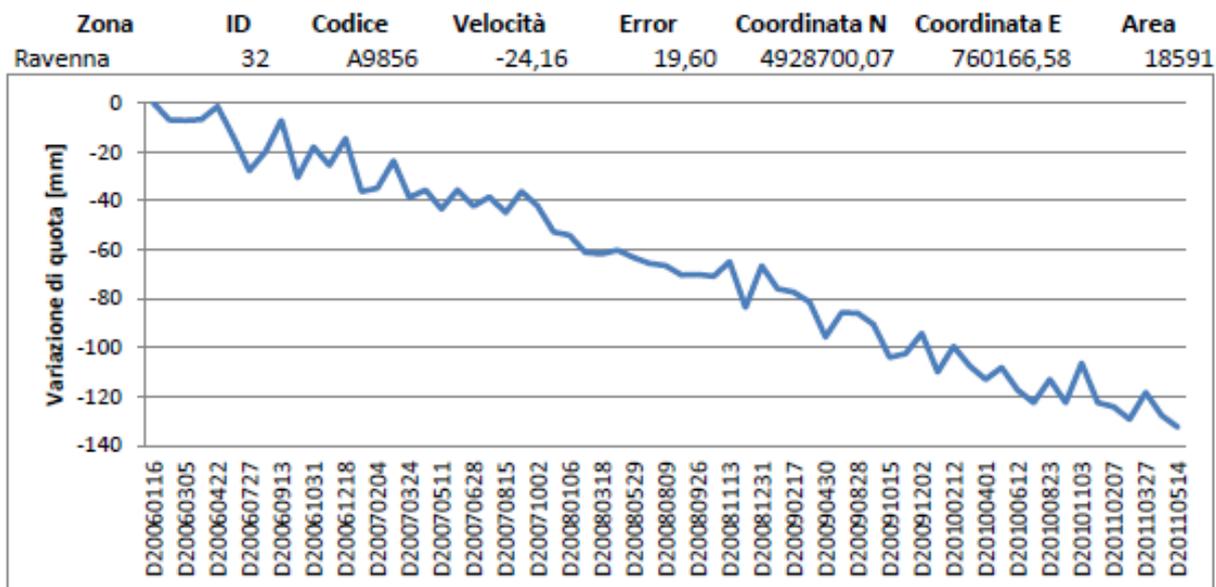


Fig. 15 - Esempio di monografia di un "outlier isolato"(DS) ricadente su uno specchio d'acqua

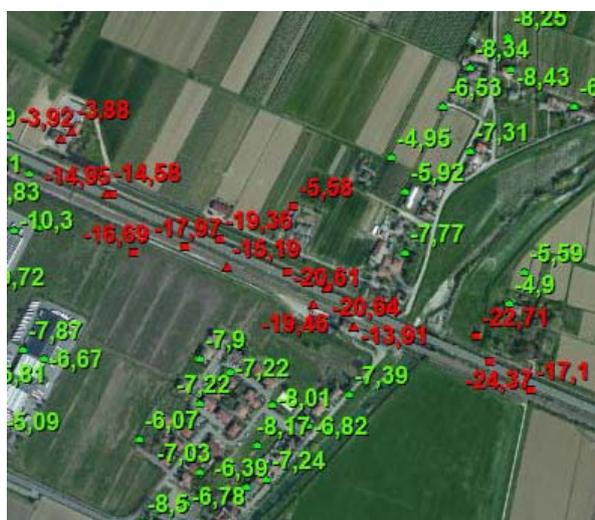


Fig. 16 - Esempio di un gruppo di outlier (PS e DS) che evidenzia il movimento anomalo di una infrastruttura

Zona	ID	Codice	Velocità	Error	Coordinata N	Coordinata E	Area
Comacchio	44	A1BNP	4,61	-7,60	4936325,21	759184,27	17075
Comacchio	45	A1DD5	2,51	-12,01	4936788,23	759715,96	15656
Comacchio	46	A1F10	-7,43	8,76	4937197,39	759079,66	16439
Comacchio	47	A1F11	-33,15	29,47	4937243,84	759737,23	11937

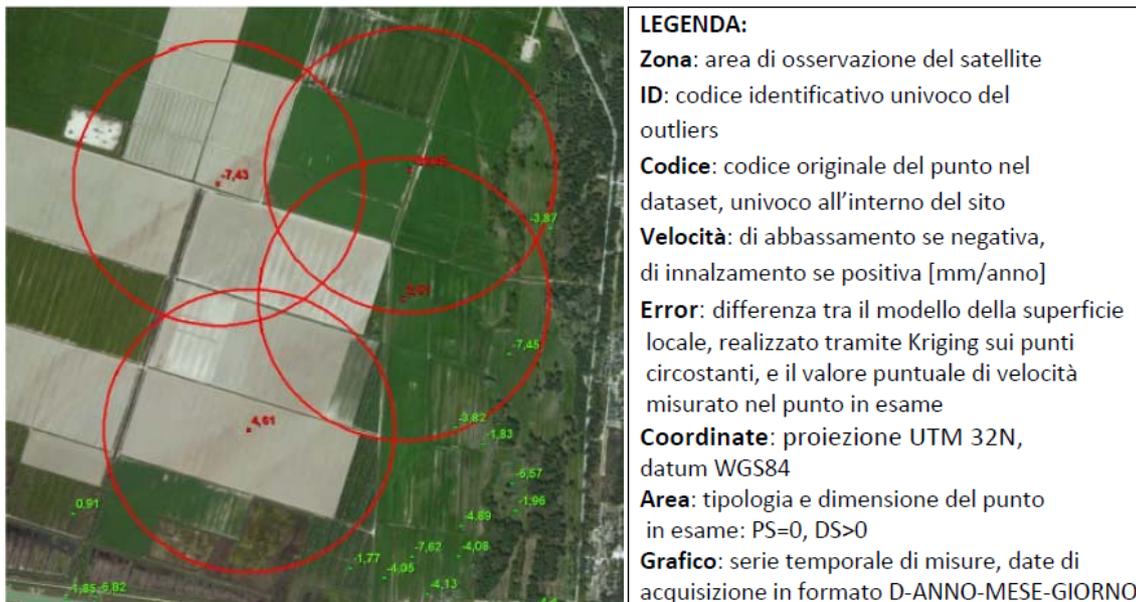
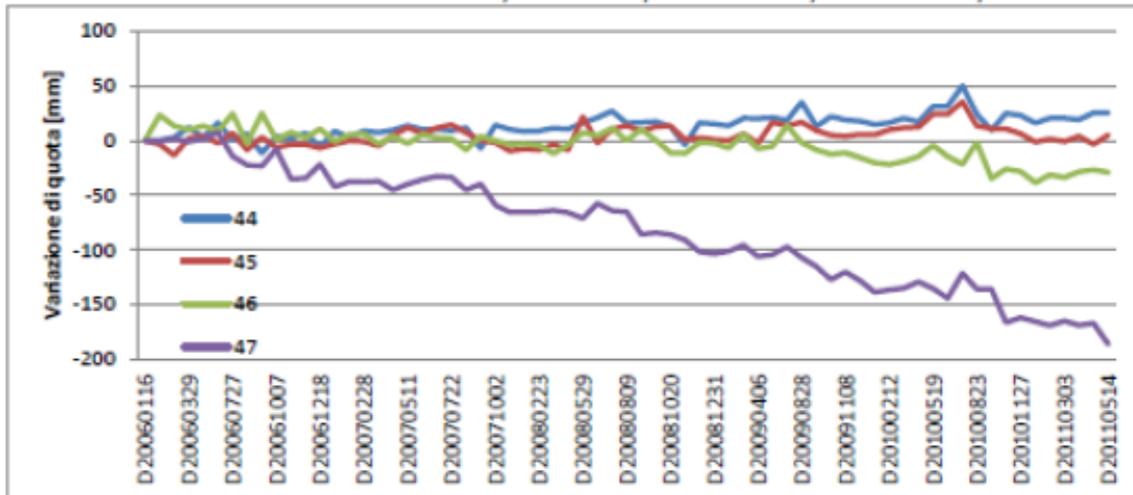


Fig. 17 - Esempio di un gruppo di outlier (DS) ricadenti su un'area agricola



Fig. 18 - Esempio di un gruppo di outlier che evidenzia il movimento anomalo di una nuova urbanizzazione (PS) e contemporaneamente uno pseudo-movimento di alcuni DS posizionati su un'area agricola

3. Analisi dei movimenti verticali del suolo

3.1 Introduzione

Il territorio osservato comprende tutta l'area di pianura della regione Emilia-Romagna compresa tra il confine regionale a nord, la linea di costa ad est e la isolina 100 m s.l.m., per un totale di circa 11.000 km². L'analisi che segue fa riferimento sia alla cartografia a curve isocinetiche sia ai singoli punti PS/DS. In particolare, questi ultimi, sono stati utilizzati al fine di evidenziare quei valori massimi di velocità che nella cartografia non sempre riescono ad essere rappresentati tramite le isolinee. Rispetto alla precedente cartografia si è potuto contare, anche grazie al nuovo algoritmo SqueeSARTM, su un numero di punti più che doppio (315.371 contro i precedenti 142.000 punti), ciò ha determinato un'informazione più capillare e diffusa che si è voluto meglio rappresentare con un'equidistanza delle curve di livello pari a 2.5 mm/anno, anziché 5 mm/anno come nella cartografia 2002-2006. Inoltre, al fine di agevolare il confronto con la cartografia relativa al precedente rilievo, oltre alla carta inerente l'intero territorio regionale di pianura, sono state prodotte anche le due carte relative al territorio della provincia di Bologna e alla zona costiera.

In particolare, è stata prodotta la seguente cartografia (in allegato):

5. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Scala 1:250.000;
6. Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2002-2006 al periodo 2006-2011. Scala 1:250.000.
7. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000;
8. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011. Zona costiera. Scala 1:100.000.

Le stesse carte sono riprodotte in formato A4 rispettivamente in Figura 19, Figura 20, Figura 29 e Figura 33

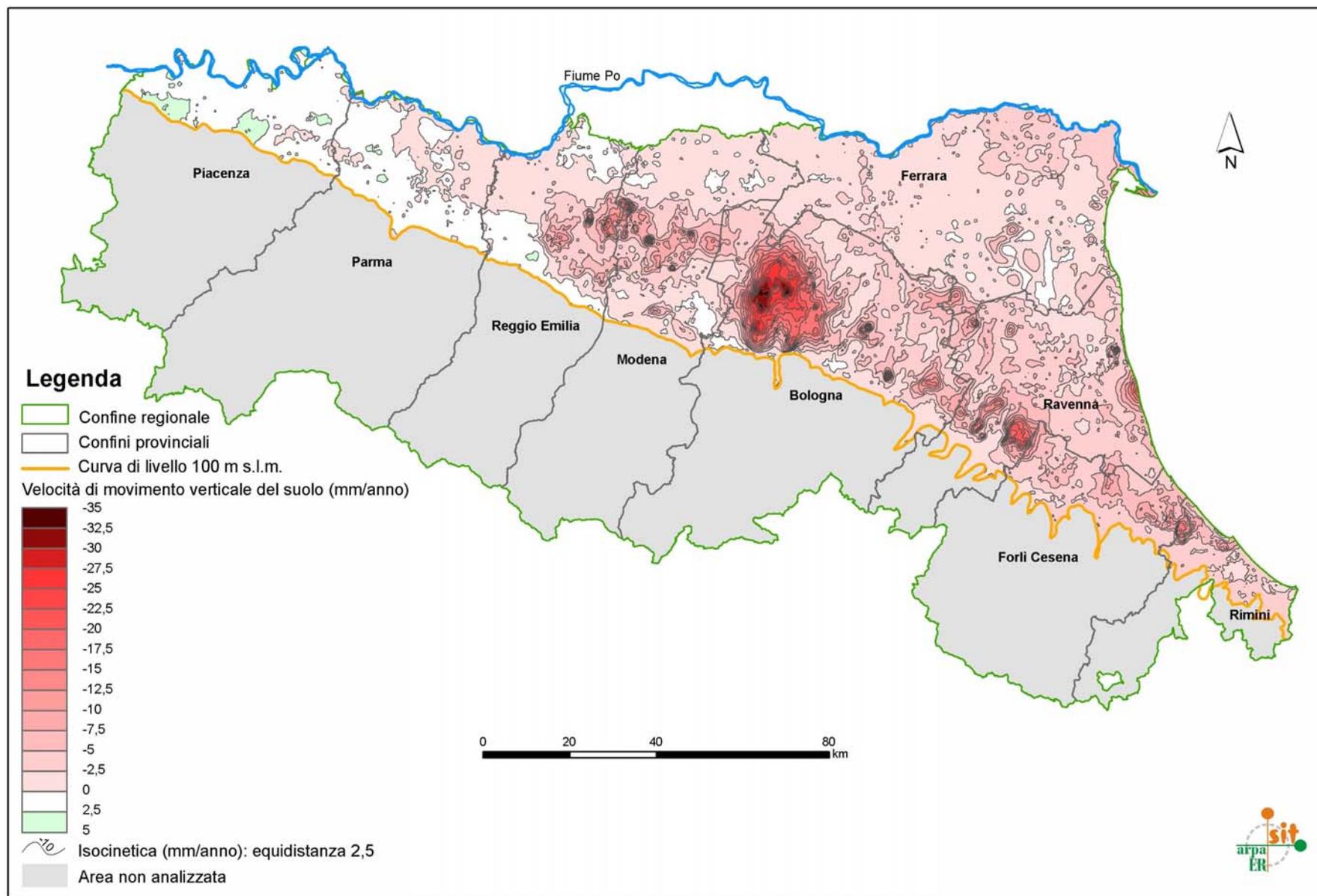


Fig. 19 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-2011

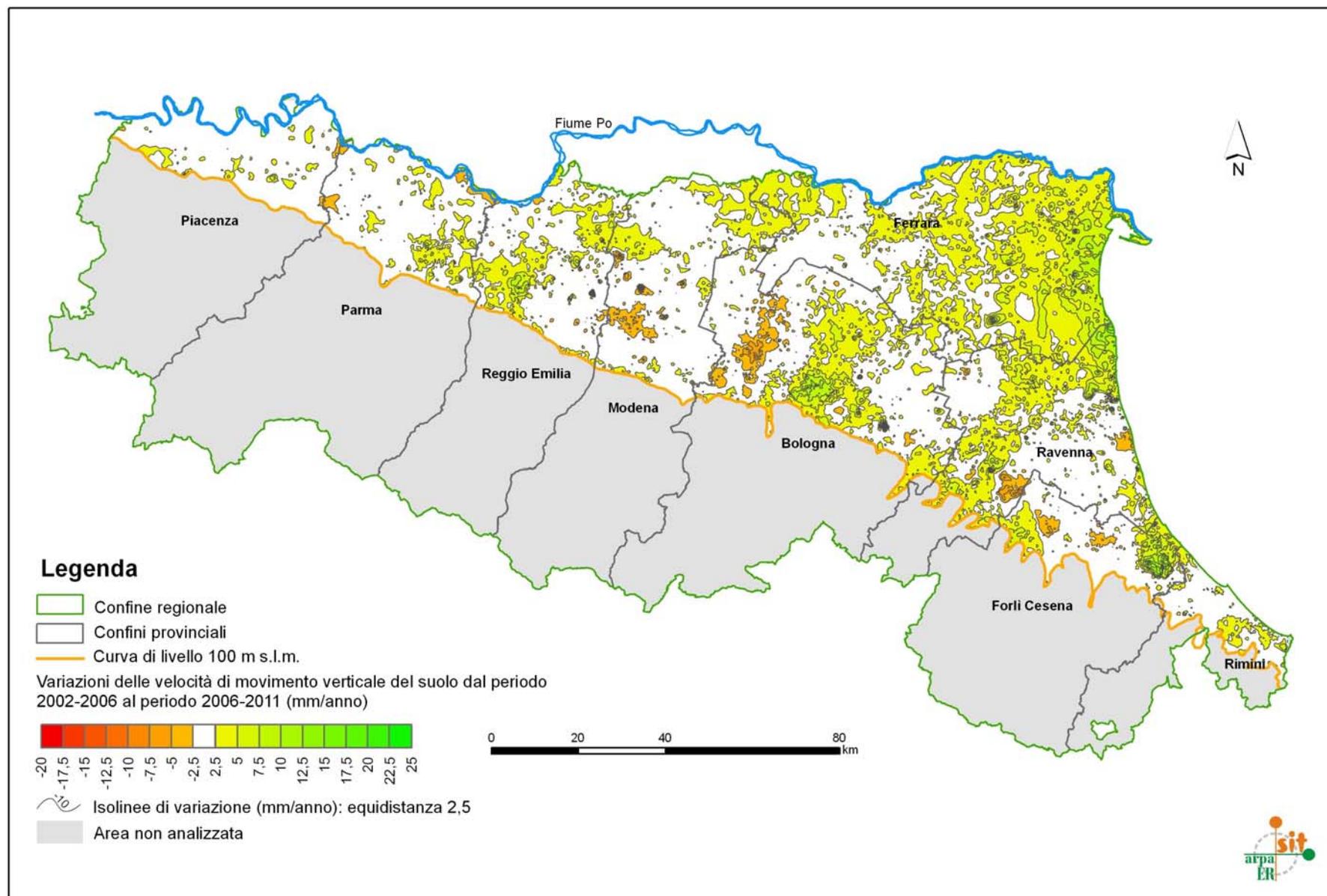


Fig. 20 - Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2002-2006 al periodo 2006-2011

3.2 Analisi dei movimenti

Rispetto al rilievo precedente (2002-06), il 62% del territorio analizzato non presenta variazioni di tendenza significative, mentre una tendenza alla riduzione degli abbassamenti si evidenzia per il 35% della superficie e, un'accentuazione del fenomeno subsidenziale (3%) è presente soprattutto nel Modenese, Bolognese Ravennate e Forlivese.

Nella Tabella 8, per ciascuna provincia, sono riportate le superfici (km² e %) relative alle variazioni di velocità di movimento tra il periodo 2002-06 ed il periodo 2006-11 raggruppate in 3 classi principali: 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 ± 2.5 mm/anno (indice di una sostanziale continuità tra i due periodi) e la terza è relativa alle superfici interessate da variazioni con tendenza positiva (riduzione dell'abbassamento).

Classi di variazione di velocità (mm/anno)	SUPERFICI (km ²)									
	PC %	PR %	RE %	MO %	BO %	FE %	RA %	FC %	RN %	
< -2,5	10 1	37 4	16 2	73 6	132 7	2 0	54 3	36 6	2 1	
-2,5 ÷ 2,5	723 92	734 79	700 68	983 76	1140 62	1036 39	843 55	381 65	248 77	
> 2,5	55 7	155 17	307 30	245 19	581 31	1592 61	635 41	169 29	71 22	
TOTALE	789	927	1023	1301	1852	2630	1532	585	321	

Tab. 8 - Superfici provinciali suddivise per classi di variazione di velocità di movimento e relative percentuali (per convenzione il segno [-] indica una variazione con tendenza negativa ovvero un incremento dell'abbassamento).

Nella Tabella 9 sono riportate, per ogni provincia, le superfici, e relative percentuali, suddivise per classi di velocità di movimento del suolo relative al periodo 2006-2011. In Figura 21 e Figura 22, per ogni provincia, sono visualizzate tramite istogrammi le superfici suddivise per classi di velocità di movimento del suolo relative rispettivamente al periodo 2002-2006 e 2006-2011.

Classi di movimento (mm/anno)	SUPERFICI (km ²)									
	PC %	PR %	RE %	MO %	BO %	FE %	RA %	FC %	RN %	
da -35 a -30				0,12 0,01	21,73 1,17					
da -30 a -25				0,29 0,02	54,54 2,95		0,08 0,01			
da -25 a -20			0,14 0,01	1,24 0,10	83,63 4,52		10,53 0,69	0,04 0,01		
da -20 a -15			4,61 0,45	4,53 0,35	121,04 6,54	0,15 0,01	24,63 1,61	4,43 0,76	0,75 0,23	
da -15 a -10			26,95 2,64	35,78 2,75	110,52 5,97	10,75 0,43	53,47 3,49	20,48 3,50	7,10 2,18	
da -10 a -5			115,96 11,35	190,59 14,65	366,48 19,79	188,38 7,60	317,46 20,72	224,39 38,38	45,34 13,92	
da -5 a 0	46,46 5,85	353,73 38,19	567,12 55,49	948,76 72,94	1061,57 57,34	2149,67 86,75	1123,28 73,33	335,38 57,36	272,41 83,65	
da 0 a 5	747,49 94,15	572,45 61,81	307,27 30,06	119,40 9,18	31,97 1,73	129,08 5,21	2,36 0,15		0,07 0,02	

Tab. 9 - Periodo 2006-2011: Superfici provinciali suddivise per classi di movimento e relative percentuali

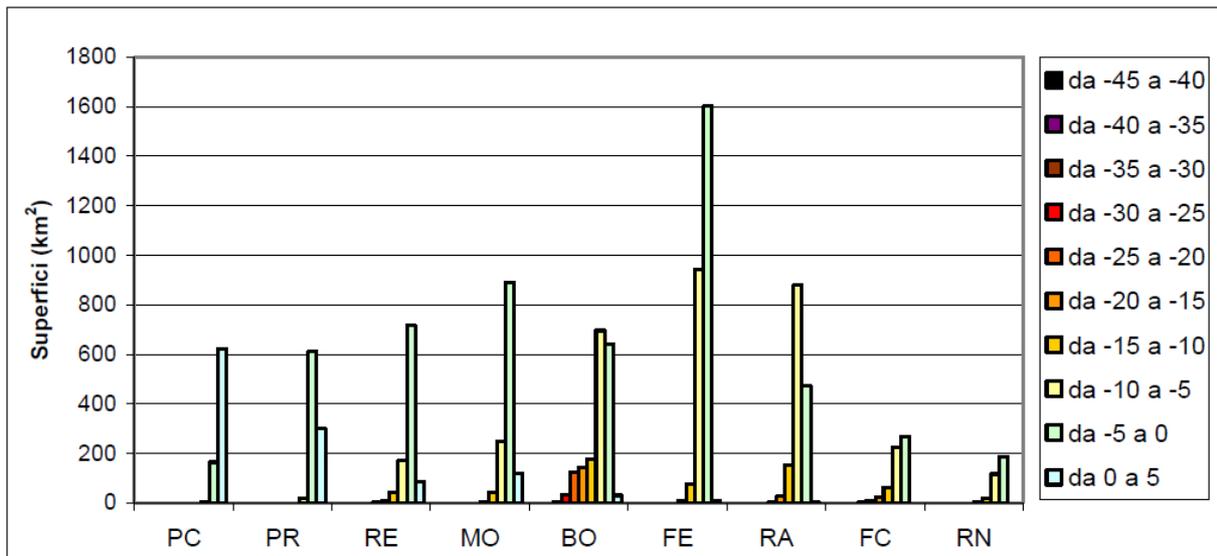


Fig. 21 - Periodo 2002-2006: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno)

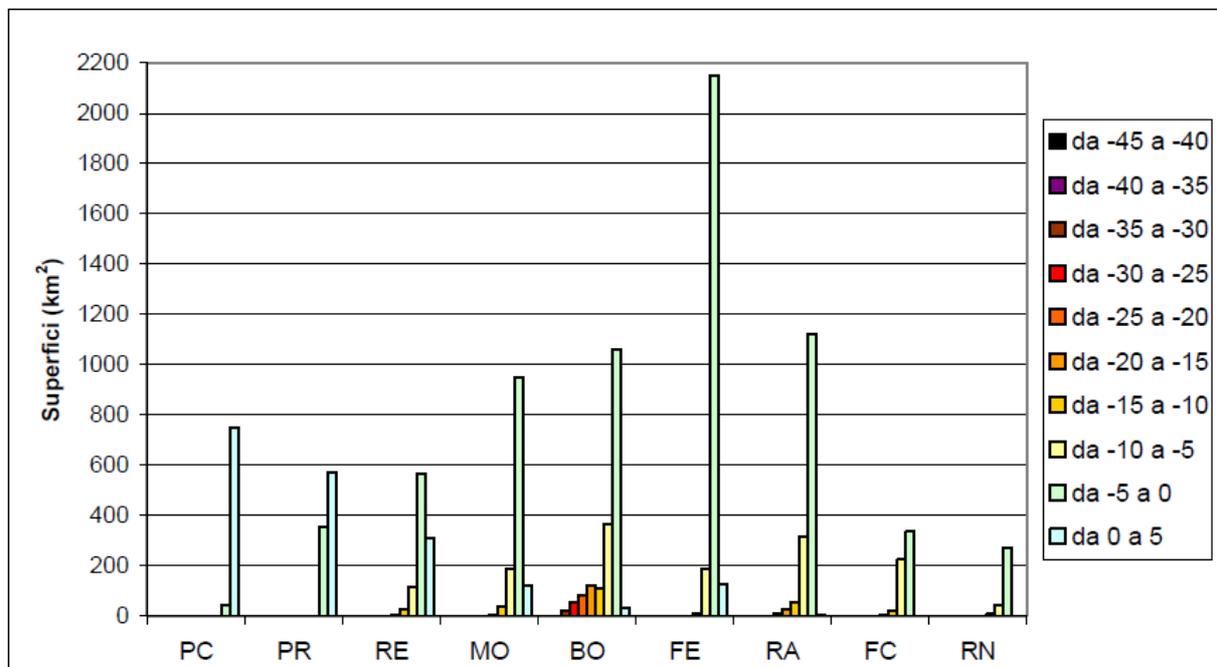


Fig. 22 - Periodo 2006-2011: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno)

Nella provincia di Piacenza si conferma la situazione di sostanziale stabilità già evidenziata nel periodo precedente. Anche il territorio parmense si conferma sostanzialmente stabile con un ulteriore decremento degli abbassamenti sulla città di Parma che presenta ora movimenti nulli; nella media e bassa pianura parmense si evidenziano abbassamenti di 2-3 mm/anno a nord-est del capoluogo. Un leggero incremento rispetto al passato si nota solo lungo una fascia molto limitata di territorio prospiciente il F. Po, tra Sacca e Mezzano Inferiore, in cui i valori, precedentemente nulli, sono ora sostituiti da qualche mm/anno di abbassamento.

Nella provincia di Reggio si alternano aree senza variazioni rispetto al passato (quasi il 70% del territorio) con aree che presentano riduzioni degli abbassamenti oltre i 5 mm/anno (30%), quest'ultimo caso è particolarmente evidente nella medio-alta pianura ad ovest del capoluogo e nella bassa pianura tra S. Giacomo, Novellara, Rio Saliceto e Reggiolo: in entrambe le aree si evidenziano ora movimenti nulli. Alcune aree in abbassamento invece sono presenti tra Reggio e Bagnolo in Piano con massimi di circa 15 mm/anno e in corrispondenza di San Prospero e di Correggio con massimi di circa 20 mm/anno (Figura 23). Un'altra area in abbassamento si nota nel territorio compreso tra la via Emilia e l'autostrada, verso il confine con la provincia di Modena, con valori medi di 5 mm/anno e massimi di oltre 10 mm/anno in corrispondenza di Rubiera.

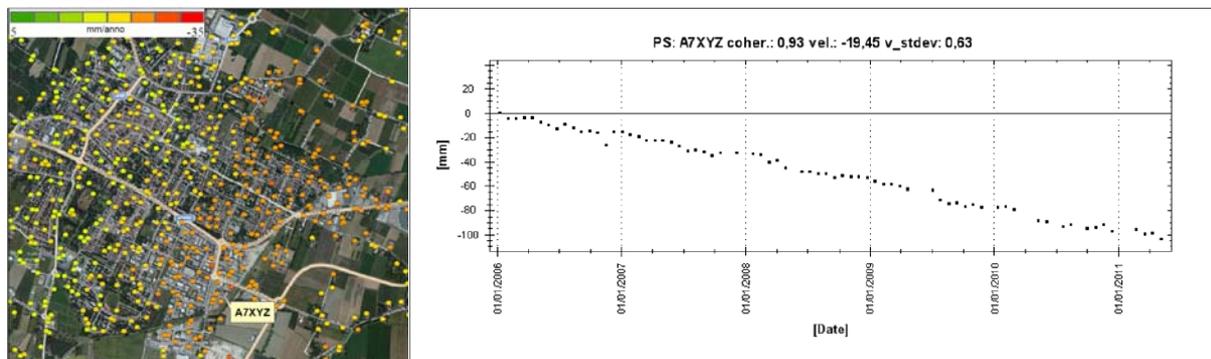


Fig. 23 - Area di Correggio con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A7XYZ (a destra)

Nella provincia di Modena, gran parte del territorio non presenta variazioni rilevanti rispetto al passato: in generale, è la media pianura modenese ad essere più interessata dagli abbassamenti con valori compresi tra 5 e 10 mm/anno e alcuni massimi in corrispondenza dell'area artigianale a nord di Bomporto con oltre 15 mm/anno e di Ravarino con oltre 10 mm/anno. Emergono, tuttavia, anche alcuni incrementi subsidenziali in corrispondenza dell'area artigianale ad ovest di Carpi, con valori massimi di circa 30 mm/anno e in corrispondenza dell'area artigianale a sud di Soliera (Figura 24), con valori massimi di oltre 35 mm/anno. Un aumento degli abbassamenti, seppure più modesto rispetto ai 2 precedenti, si evidenzia anche a ridosso della via Emilia, su un'areale esteso che, comprendendo la parte ovest della città di Modena, si spinge fino a Campogalliano ed entra nel Reggiano fino a Rubiera: i valori si aggirano mediamente intorno a 5 mm/anno. Si nota, invece, una riduzione degli abbassamenti a nord di Carpi in continuità con l'areale corrispondente di Rio Saliceto già evidenziato per il territorio reggiano.

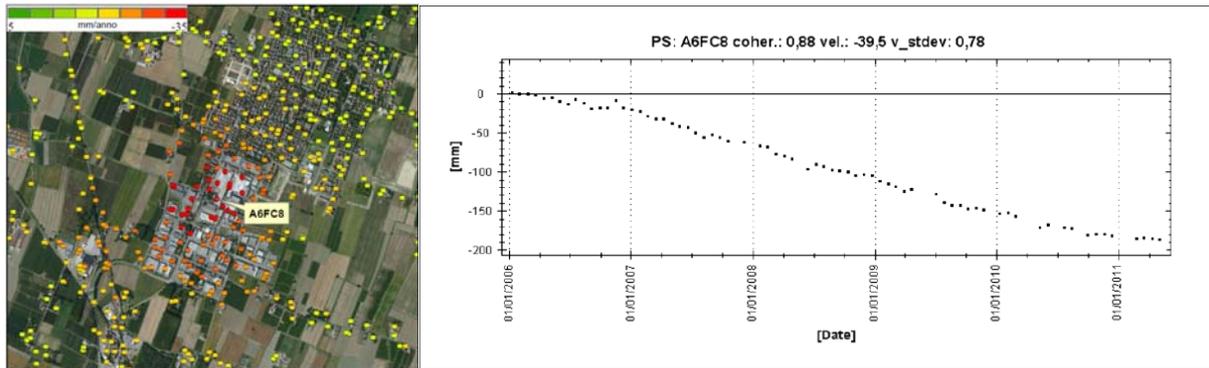


Fig. 24 - Area di Soliera con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A6FC8 (a destra)

La provincia di Bologna è storicamente la più subsidente e tuttora conserva questo primato, sebbene già da alcuni decenni sia in atto una progressiva diminuzione degli abbassamenti, messa in luce anche dal presente rilievo per un'area pari ad oltre il 30% del territorio di pianura. Per tale area si notano riduzioni importanti: fino a 10 mm/anno di variazione. Si evidenziano tuttavia anche aree in continuità rispetto al periodo precedente (pari ad oltre il 60%) ed aree che presentano un'inversione di tendenza (pari al 7%) anche se con un aumento degli abbassamenti abbastanza contenuto: variazione massima di 5 mm/anno.

In particolare, è ancora presente, seppure ridotta rispetto al passato, un'ampia area di depressione di oltre 500 km² (Figura 29). Il confine di tale area a sud lambisce Zola Predosa e attraversa la città di Bologna fino a Castenaso; a ovest, passa per Ponte Samoggia, S. Giovanni in Persiceto e S. Matteo della Decima, a nord tocca Pieve di Cento e ad est coincide con i centri di S. Giorgio di Piano, Minerbio, Granarolo e Castenaso. In quest'area, che presenta una subsidenza media di circa 15 mm/anno, si distinguono, in particolare, alcuni coni di depressione piuttosto pronunciati: Sala Bolognese (Figura 25) e Lavino di Sotto con massimi di circa 35 mm/anno; la zona artigianale tra Lavino di Mezzo e Anzola dell'Emilia (Figura 26) con un massimo di 30 mm/anno (entrambe queste zone presentano un aumento degli abbassamenti rispetto al precedente rilievo); la cassa di espansione a ridosso del F. Reno nei pressi di Malacappa con circa 35 mm/anno; Castello d'Argile con oltre 30 mm/anno e Castelmaggiore con oltre 20 mm/anno; in quest'ultima area, in particolare, diversamente dalle altre, la serie temporale di Figura 27 mette in evidenza come, nell'ultimo anno e mezzo, la subsidenza si sia sostanzialmente azzerata. Si ricorda che l'area di Castelmaggiore è stata negli ultimi circa 60 anni una delle più subsidenti, avendo perso dal 1950 al 2005 oltre 3 m di quota.

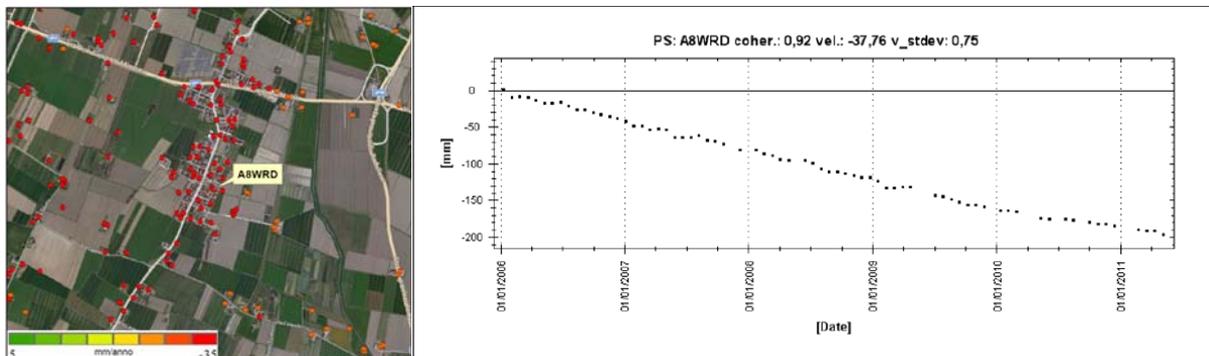


Fig. 25 - Area di Sala Bolognese con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A8WRD (a destra)

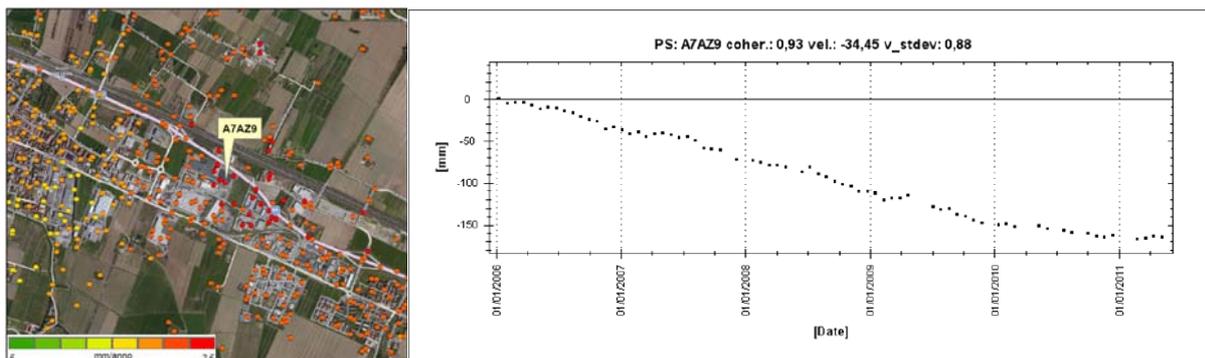


Fig. 26 - Area di Lavino di Mezzo - Anzola dell'Emilia con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A7AZ9 (a destra)

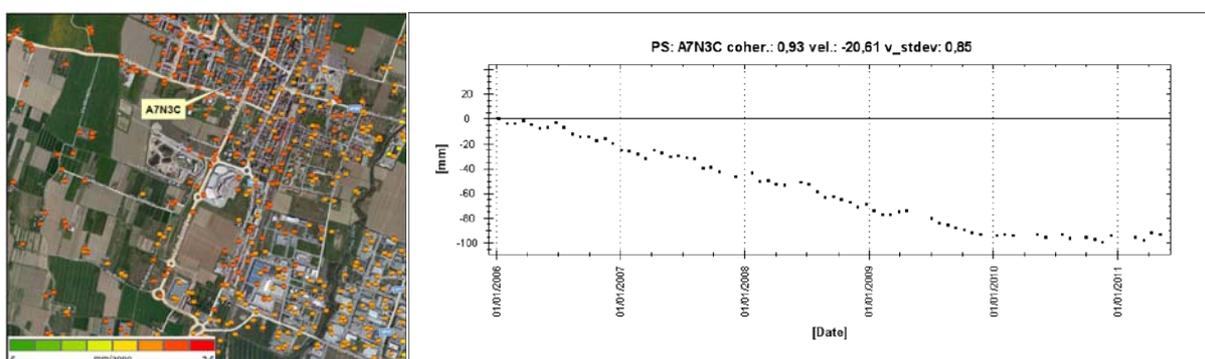


Fig. 27 - Area di Castelmaggiore con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A7N3C (a destra)

All'esterno di quest'ampia area subsidente sono presenti altri due coni di depressione significativi, seppure arealmente molto limitati: uno in corrispondenza di Budrio, con massimi di oltre 25 mm/anno, e un altro in corrispondenza della zona industriale Ca' Bianca ad ovest di Castel San Pietro con massimi di oltre 30 mm/anno, entrambi in aumento rispetto al passato; adiacente a quest'ultima zona, in corrispondenza dell'area artigianale Poggio Piccolo, si evidenzia invece una forte riduzione della subsidenza con valori attuali tra 5 e 10 mm/anno laddove prima erano presenti valori massimi oltre i 30 mm/anno.

Nel centro di Bologna (all'interno dei viali di circonvallazione) continua il trend di riduzione degli abbassamenti che, mediamente, risultano ora intorno a 3 mm/anno (Figura 28).

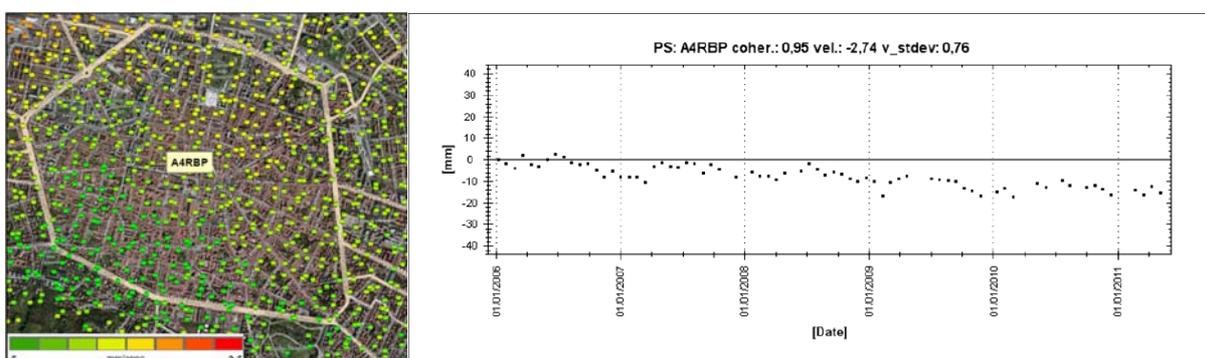


Fig. 28 - Bologna centro con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A4RBP (a destra)

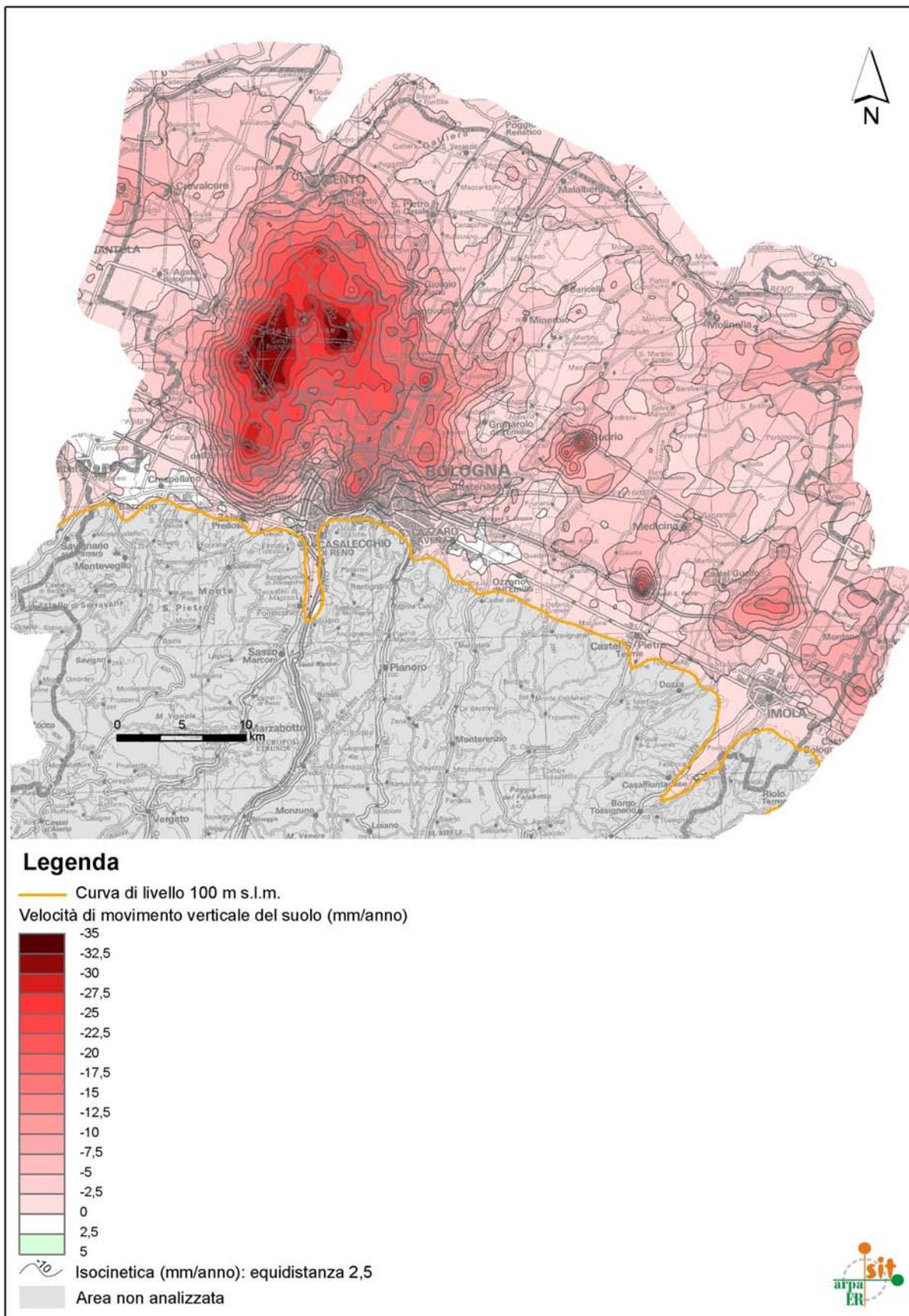


Fig. 29 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-20011. Provincia di Bologna

Nella provincia di Ferrara si evidenzia, per oltre il 60% della superficie, una diminuzione degli abbassamenti che mediamente si attestano intorno a 2 mm/anno. In sostanza tutto il territorio è esente da abbassamenti significativi. Approssimandosi al Delta del Po, com'è naturale, si nota una leggera accentuazione del fenomeno di qualche mm/anno. I valori massimi, di oltre 10 mm/anno, si toccano solo in corrispondenza dello Scanno di Goro, nell'estrema propaggine sud del Delta.

La provincia di Ravenna non presenta, per il 55% della superficie, variazioni significative rispetto al precedente rilievo, mentre oltre il 40% del territorio evidenzia una riduzione degli abbassamenti che, mediamente, si attestano intorno a 4 mm/anno. Si notano, però, anche alcune eccezioni come la storica depressione in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti, con massimi di oltre 20 mm/anno (Figura 30) e il Faentino: la città di Faenza, è pressoché esente da abbassamenti significativi, tuttavia si trova contornata da due ampie aree subsidenziali, complessivamente di oltre 200 km² con un abbassamento medio di circa 10 mm/anno: la prima, ad ovest della città, inizia sulla via Emilia, abbraccia il corso del T. Senio e si spinge verso nord sino a toccare Lugo e Cotignola, con massimi di 15 mm/anno, uno a sud dell'autostrada ed un altro all'altezza di San Severo; la seconda area, ad est della città, inizia sulla via Emilia, si estende verso nord tra il F. Lamone ed il F. Montone sino a comprendere Cotignola e lambire Russi, ad est sconfina nel Forlivese toccando Villanova e Villafranca di Forlì; tale area presenta abbassamenti massimi di circa 25 mm/anno (Figura 31). Oltre al Faentino, sono da notare anche altri due coni di depressione, molto più piccoli e circoscritti rispetto ai precedenti, in corrispondenza della zona industriale Bacino Trattaroli, ad ovest di Marina di Ravenna e di una zona a nord di Conselice con massimi di oltre 15 mm/anno. La città di Ravenna presenta abbassamenti massimi intorno a 2-3 mm/anno.

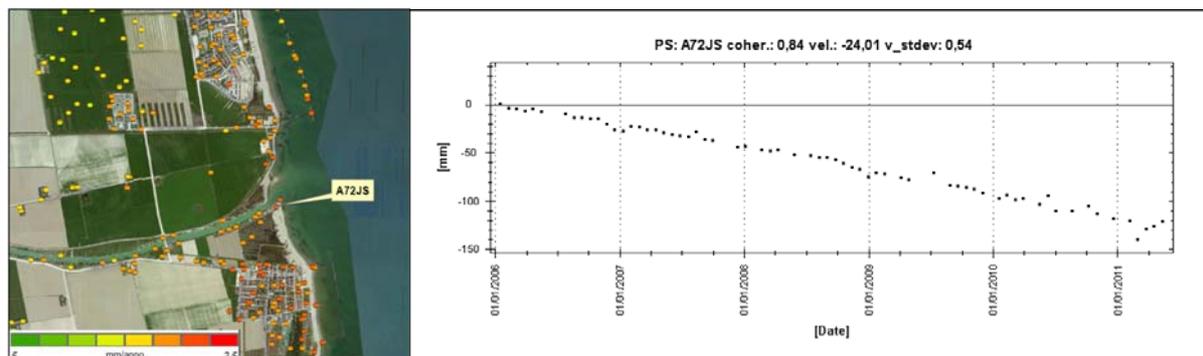


Fig. 30 - Area di Foce Fiumi Uniti con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A72JS (a destra)

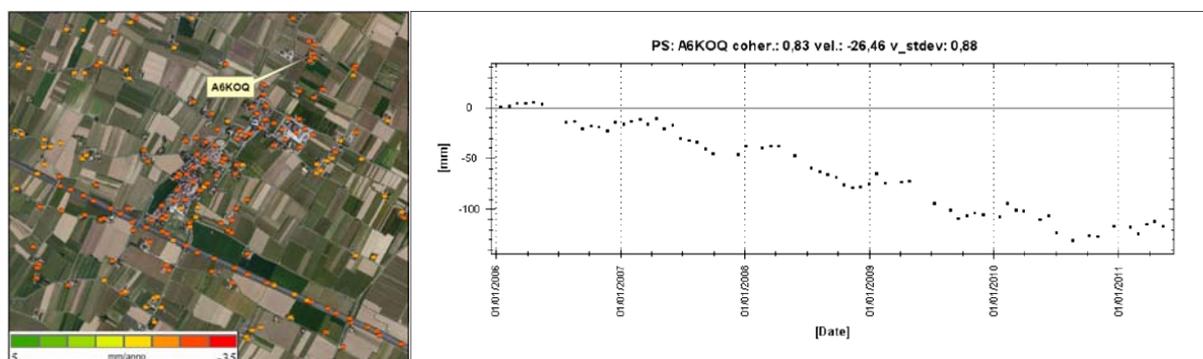


Fig. 31 - Area di Birandola (Faentino) con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A6KOQ (a destra)

Nella provincia di Forlì-Cesena si evidenziano abbassamenti medi di circa 5 mm/anno. Continua la tendenza alla riduzione degli abbassamenti nell'area a nord di Gambettola e

Savignano sul Rubicone, in cui si notano abbassamenti medi tra 5 e 10 mm/anno e massimi di circa 20 mm/anno localizzati in prossimità di San Mauro Pascoli; la serie temporale di Figura 32 mette in evidenza, per quest'ultima località, la forte riduzione della subsidenza in corrispondenza dell'ultimo anno. Una leggera accentuazione del fenomeno si nota invece in un'area a nord di Cesena con abbassamenti massimi di oltre 10 mm/anno. La città di Forlì presenta abbassamenti medi di circa 5 mm/anno.

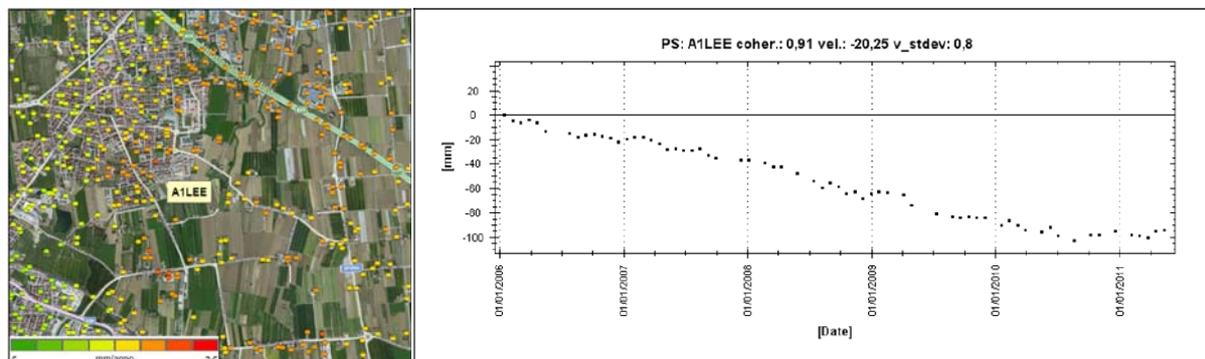


Fig. 32 - Area di San Mauro Pascoli con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A1LEE (a destra)

Nella provincia di Rimini circa l'80% del territorio non presenta variazioni di tendenza significative e, per il rimanente, si registra una riduzione degli abbassamenti che ora si attestano mediamente a poco meno di 4 mm/anno. Nella città di Rimini, in corrispondenza del litorale a sud del molo, si notano abbassamenti medi di circa 6-7 mm/anno e qualche massimo fino a 9 mm/anno, con un leggero incremento verso l'entroterra, ove si raggiungono anche valori superiori ai 10 mm/anno. Abbassamenti massimi di circa 15 mm/anno sono presenti a ridosso del confine con il territorio di Savignano sul Rubicone.

Osservando infine il litorale nel suo complesso (Figura 33), si evidenzia una prevalente tendenza alla diminuzione degli abbassamenti. Ciò è particolarmente evidente per tutto il litorale ferrarese e in parte ravennate, almeno sino a Marina di Ravenna, con abbassamenti generalmente di pochi mm/anno. Approssimandosi al Delta del Po, si notano abbassamenti di poco superiori che raggiungono un massimo in corrispondenza dello Scanno di Goro di oltre 10 mm/anno. In corrispondenza di Porto Corsini - Marina di Ravenna si osservano abbassamenti di circa 5 mm/anno. Anche l'area di depressione storicamente localizzata nella zona di Dosso degli Angeli - Foce Reno appare ora priva di movimenti significativi.

Persiste invece nel litorale ravennate un'ampia area di subsidenza che interessa il paraggio costiero da Lido Adriano fino ad oltre la Bocca del T. Bevano, con un massimo di oltre 20 mm/anno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti ed un'estensione massima verso l'entroterra di circa 5 km: l'area presenta valori con qualche leggero incremento rispetto al precedente rilievo ma, soprattutto, appare ora meglio definita grazie alla maggiore quantità di dati resi disponibili dal nuovo algoritmo utilizzato per l'analisi interferometrica.

Il rimanente litorale ravennate presenta invece una riduzione degli abbassamenti con valori attuali fino a circa 5 mm/anno che si confermano anche più a sud tra Cesenatico e Bellaria. Da Bellaria a Rimini gli abbassamenti si riducono ulteriormente fino a 2-3 mm/anno. Il litorale riminese, a sud del molo, presenta valori massimi di 8-9 mm/anno per un tratto di circa 1 km che si riducono però rapidamente ad alcuni mm/anno lungo tutto il litorale fino a Cattolica.

Il litorale nella sua interezza presenta un abbassamento medio, relativamente ad una fascia di 5 km verso l'entroterra, di circa 4 mm/anno, sostanzialmente dimezzato rispetto al periodo precedente.

Nella Tabella 10 sono riportate le velocità di abbassamento nei 3 periodi 1987-1999, 1999-2005, 2006-2011 e l'abbassamento totale nel periodo 1984-2011 per diverse località costiere da Cattolica sino alla foce del Po di Goro. Per ciascuna località è stato scelto un caposaldo di livellazione che presentasse una serie storica continuativa a partire dal primo rilievo del 1984⁹; L'abbassamento totale è stato calcolato aggiornando la quota di ogni caposaldo al 2011 tramite la velocità di abbassamento desunta dai risultati dell'analisi interferometrica. Come si può osservare, nel periodo più recente, prevale nettamente la tendenza alla riduzione degli abbassamenti, fatta eccezione per il paraggio di Lido di Dante (foce Fiumi Uniti) che presenta anche il valore più alto dell'intero arco costiero con 21 mm/anno. Per quanto riguarda gli abbassamenti complessivi dal 1984 al 2011, ancora Lido di Dante appare la località più subsidente (45 cm) insieme al limitrofo Lido Adriano (40 cm), seguono Dosso degli Angeli (foce F. Reno) e Porto Corsini con 38 cm.

Caposaldo	Velocità di abbassamento nel periodo 1987-1999 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 1999-2005 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 2006-2011 (mm/anno)	Abbassamento 1984-2011 (cm)	Località
122350	2	4	4	-10	Cattolica
122030	6	9	6	-25	Rimini
123120	2	6	3	-16	Torre Pedrera
123250	9	10	6	-26	Bellaria
123330	12	10	6	-35	Gatteo a Mare
123410	10	9	5	-36	Cesenatico
123590	6	8	5	-25	Pinarella di Cervia
111011	9	10	7	-33	Milano Marittima
111061	9	10	6	-27	Lido di Savio
128040	8	11	11	-28	Foce Bevano
000770	12	19	21	-45	Lido di Dante
130070	13	15	14	-40	Lido Adriano
130190	11	10	5	-29	Punta Marina
130280	10	8	5	-25	Marina di Ravenna
104012	15	13	7	-38	Porto Corsini
104101	11	10	3	-27	Casalborsetti
102030	18	13	2	-38	Dosso degli Angeli
097010	8	8	3	-19	Portogaribaldi
097090	13	10	2	-27	Lido delle Nazioni
140030	11	7	5	-24	Boscone della Mesola
140080	17	10	8	-37	Goro
140181	-	9	9		Foce del Po di Goro

Tab 10 - Confronto tra le velocità di abbassamento nei periodi 1987-1999, 1999-2005, 2006-2011 e abbassamento complessivo nel periodo 1984-2011 per diverse località costiere (nell'ultimo periodo è evidenziata in rosso la velocità in aumento e in verde la velocità in diminuzione rispetto al periodo precedente).

⁹ L'unica eccezione è il caposaldo 140181 alla foce del Po di Goro istituito nel 1993 e quindi mancante delle misure 1984 e 1987.

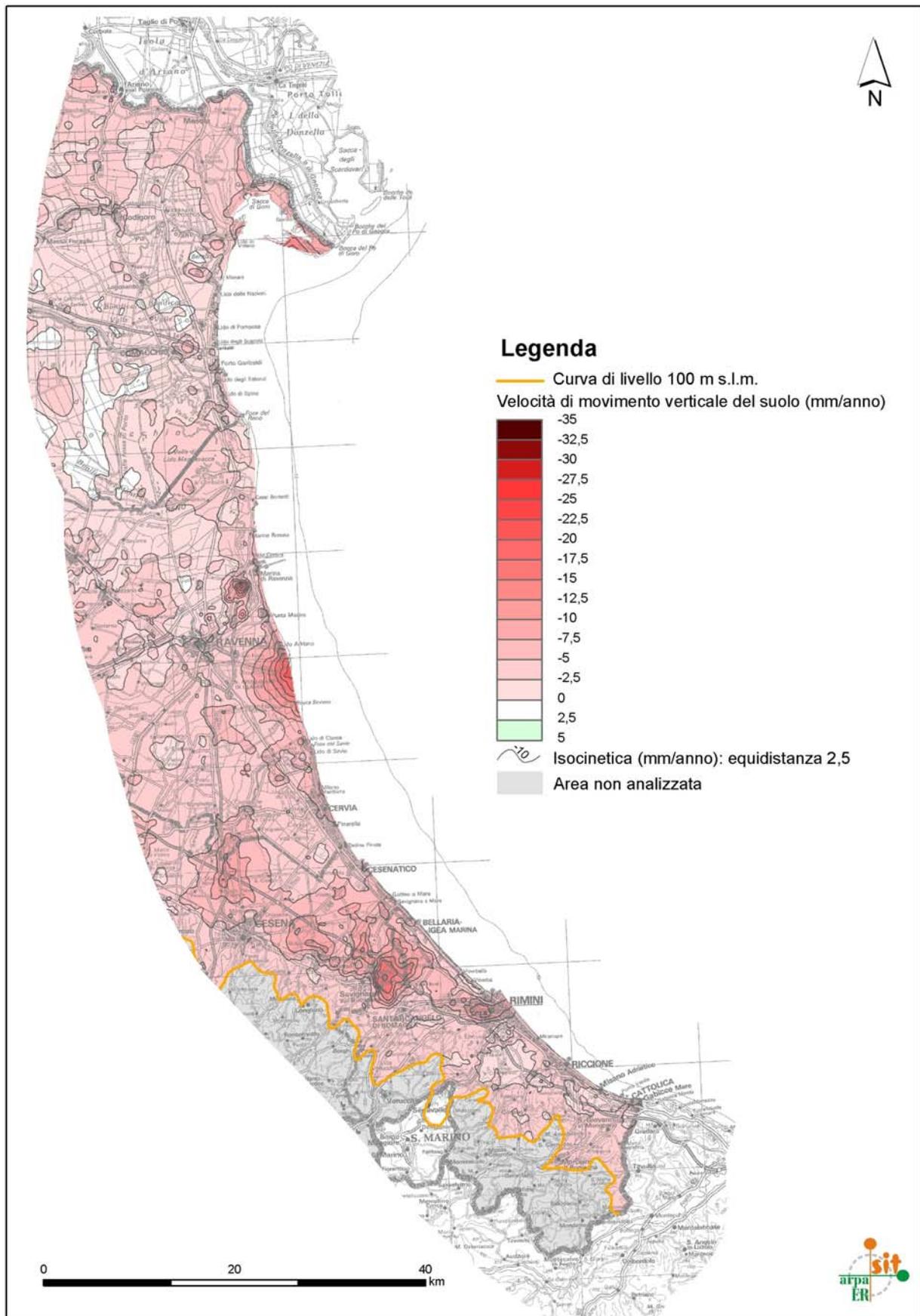


Fig. 33 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-20011. Zona costiera

4. Conclusioni

Il presente lavoro aggiorna al periodo 2006-11 le conoscenze relative alle velocità di movimento verticale del suolo, sull'intera area di pianura regionale, rispetto al precedente rilievo riferito al periodo 2002-06. In particolare si è proceduto attraverso due fasi successive: in una prima fase (2011) è stata effettuata l'analisi interferometrica tramite la tecnica SqueeSAR™ dei dati radar satellitari acquisiti sull'intera area di pianura della regione, individuando i punti di misura (PS e DS) presenti, le loro velocità medie annue e le relative serie storiche di spostamento nel periodo 2006-2011. Contemporaneamente sono stati elaborati i dati acquisiti da 17 stazioni GPS permanenti al fine di calibrare e verificare, tramite valori di velocità di movimento verticale, i dati relativi provenienti dall'analisi SqueeSAR™. In tal modo, per la prima volta nel rilievo della subsidenza in Emilia-Romagna, si è andati verso il superamento del concetto di punto di riferimento assoluto all'interno di una rete geodetica - storicamente assunto a priori come fisso ed immutabile nel tempo sulla base di considerazioni di generica stabilità del contesto geologico strutturale dell'area. In sostanza, la singola stazione GPS diviene essa stessa un punto di riferimento, non già in virtù di una presunta stabilità assoluta, bensì grazie alla conoscenza precisa dei suoi movimenti misurati nel tempo. Già in questa prima fase si è proceduto ad una calibrazione preliminare dei risultati dell'analisi SqueeSAR™, tramite i dati di movimento verticale, ottenuti dall'elaborazione di sei stazioni permanenti GPS, opportunamente selezionate rispetto alle 17 stazioni complessivamente elaborate.

Nella seconda fase del lavoro (2012) si è proceduto alla verifica e validazione dei dati interferometrici utilizzando tutte le stazioni permanenti GPS precedentemente elaborate presenti sul territorio regionale. Successivamente è stata effettuata un'analisi particolarmente accurata sull'insieme dei PS/DS (318.625) al fine di selezionare i punti considerati non significativi e fuorvianti rispetto alle finalità del nostro lavoro: sono state implementate quindi procedure volte alla ricerca di punti, caratterizzati da velocità "anomale" rispetto al loro intorno, indicativi di fenomeni diversi non attinenti al fenomeno della subsidenza a carattere regionale che si voleva rappresentare. Si tratta, in sostanza, di fenomeni estremamente localizzati legati a cedimenti di singole strutture, all'asestamento di opere di recente costruzione oppure, in taluni casi, specialmente in aree agricole, riconducibili a variazioni di umidità del terreno che comportano sfasamenti nel segnale SAR erroneamente identificati come movimento. Le procedure di selezione implementate hanno portato ad un dataset finale pari a 315.371 punti, essendo stati scartati 3.254 punti i quali, tuttavia, non si esclude possano comunque essere utilizzati per finalità diverse da quelle che hanno informato il presente lavoro.

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 2006-2011, tramite una rappresentazione a curve isocinetiche le quali, anche grazie alla maggiore precisione del dato che si stima intorno a ± 2 mm/anno, hanno potuto essere delineate con un passo di 2.5 mm/anno, inferiore rispetto a quello adottato nella precedente cartografia (5 mm/anno). In conclusione si può affermare che il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari supportato dall'elaborazione di stazioni permanenti GPS ha risposto pienamente ai risultati attesi, ed il suo futuro utilizzo potrà essere ulteriormente affinato considerando il previsto aumento di stazioni GPS sul territorio regionale.

Dall'esame degli elaborati prodotti si evince che la gran parte del territorio non presenta nel periodo 2006-11 variazioni di tendenza rispetto al precedente rilievo; circa un terzo della

superficie evidenzia una riduzione della subsidenza e appena il 3% un incremento, presente in particolare nel Modenese, Bolognese, Ravennate e Forlivese.

Nelle province di Piacenza e Parma si conferma la situazione di sostanziale stabilità già evidenziata nel periodo precedente; Nella provincia di Reggio Emilia si evidenziano movimenti significativi soprattutto in corrispondenza di San Prospero e di Correggio con massimi di circa 20 mm/anno. In provincia di Modena si notano nella media pianura abbassamenti compresi tra 5 e 10 mm/anno e alcuni picchi localizzati in prossimità di Carpi e di Soliera con massimi intorno a 30 mm/anno, e a Bomporto e Ravarino con massimi rispettivamente di oltre 20 mm/anno e di oltre 10 mm/anno.

Il Bolognese si conferma come il territorio più subsidente, nonostante continui la tendenza, già in atto da alcuni decenni, verso una progressiva riduzione degli abbassamenti. Persiste, infatti, un'ampia area a ridosso della città di Bologna, con una superficie di oltre 500 km², con un abbassamento medio di circa 15 mm/anno e punte massime di oltre 30 mm/anno in corrispondenza di Sala Bolognese, Lavino di Sotto e dell'area tra Lavino di Mezzo e Anzola dell'Emilia; di oltre 35 mm/anno in corrispondenza della cassa di espansione a ridosso del F. Reno nei pressi di Malacappa; di oltre 30 mm/anno a Castello d'Argile e di oltre 20 mm/anno a Castelmaggiore. Altri picchi, seppure arealmente molto più limitati, sono presenti a Budrio, con oltre 25 mm/anno e in corrispondenza della zona industriale Ca' Bianca (Castel San Pietro) con oltre 30 mm/anno. Il centro storico di Bologna, in particolare, risulta invece esente da abbassamenti significativi (alcuni mm/anno).

Nella provincia di Ferrara non si evidenziano abbassamenti significativi.

Nella provincia di Ravenna si evidenziano in particolare gli abbassamenti in corrispondenza della Foce dei Fiumi Uniti ed entroterra con massimi di oltre 20 mm/anno e in ampie zone del Faentino con massimi di circa 25 mm/anno; altri con di depressione arealmente più limitati sono presenti in corrispondenza della zona industriale Bacino Trattaroli, ad ovest di Marina di Ravenna e a nord di Conselice con massimi di oltre 15 mm/anno. La città di Ravenna si conferma sostanzialmente stabile con abbassamenti massimi intorno a 2-3 mm/anno.

La provincia di Forlì-Cesena presenta abbassamenti medi di circa 5 mm/anno con massimi di circa 20 mm/anno in prossimità di San Mauro Pascoli e di oltre 10 mm/anno a nord di Cesena. La città di Forlì presenta abbassamenti di circa 5 mm/anno.

In provincia di Rimini si registrano abbassamenti medi di circa 4 mm/anno con massimi di circa 10 mm/anno nella città di Rimini e di circa 15 mm/anno in prossimità di Savignano sul Rubicone.

Il litorale, nel suo complesso, mostra una prevalente tendenza alla diminuzione della subsidenza. Si notano abbassamenti di pochi mm/anno su tutto il litorale ferrarese; il litorale ravennate presenta abbassamenti generalmente fino a circa 5 mm/anno, fatta eccezione per un'area di depressione che interessa il paraggio costiero da Lido Adriano fino ad oltre la Bocca del T. Bevano, con un massimo di oltre 20 mm/anno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti ed un'estensione massima verso l'entroterra di circa 5 km. Più a sud, tra Cesenatico e Bellaria, gli abbassamenti ritornano intorno a 5 mm/anno e si riducono ulteriormente fino a 2-3 mm/anno fino a Rimini. Il litorale riminese, a sud del molo, presenta valori leggermente superiori - fino a circa 8-9 mm/anno per un tratto di 1 km - che si riducono però rapidamente ad alcuni mm/anno lungo tutto il litorale fino a Cattolica.

Il litorale nella sua interezza presenta un abbassamento medio, relativamente ad una fascia di 5 km verso l'entroterra, di circa 4 mm/anno, sostanzialmente dimezzato rispetto al periodo precedente.