



Ministero dello Sviluppo Economico

**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

Una collaborazione tra Enti di ricerca:

- Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV, Roma
- Università degli Studi di Bologna "Alma Mater Studiorum" – DICAM, Bologna
- Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR-IREA, Napoli
- Ricerca Sistema Energetico - RSE, Milano
- Politecnico di Torino, Torino

e Pubbliche Amministrazioni:

- Ministero dello Sviluppo Economico – Direzione Generale per le Infrastrutture e la Sicurezza dei Sistemi Energetici e Geominerari DGISSEG (ex DGS-UNMIG)
- Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Bologna



**POLITECNICO
DI TORINO**



Citazione raccomandata:

Dialuce G., Dell'Orso M., Antoncecchi 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".

ISBN 9788894366969

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

Nome	Affiliazione	ORCID	e-mail
Antoncecchi Ilaria	1,7*	0000-0002-3164-0794	ilaria.antoncecchi.ext@mise.gov.it
Ciccione Francesco	1,9*	0000-0002-6770-880X	f.ciccione.ext@mise.gov.it
Dell'Orso Marcello	1		marcello.dellorso@mise.gov.it
Dialuce Gilberto	1		gilberto.dialuce@mise.gov.it
Agate Giordano	7		giordano.agate@rse-web.it
Colucci Francesca	7		francesca.colucci@rse-web.it
Moia Fabio	7		
Billi Andrea	10	0000-0002-6368-1873	andrea.billi@cnr.it
Carminati Eugenio	3	0000-0003-4383-4171	eugenio.carminati@uniroma1.it
Cuffaro Marco	10	0000-0003-0626-1378	marco.cuffaro@igag.cnr.it
D'Ambrosio Andrea	3	0000-0003-0332-4599	a.dambrosio@uniroma1.it
Dogliani Carlo	3,4	0000-0002-8651-6387	carlo.dogliani@uniroma1.it
Livani Michele	10	0000-0002-0362-210X	michele.livani@igag.cnr.it
Maffucci Roberta	3	0000-0003-0144-1679	roberta.maffucci@uniroma1.it
Petricca Patrizio	3	0000-0003-1186-4296	patrizio.petricca@uniroma1.it
Petracchini Lorenzo	10	0000-0002-3239-4759	lorenzo.petracchini@igag.cnr.it
Benetatos Christoforos	8	0000-0002-2752-9428	christoforos.benetatos@polito.it
Rocca Vera	8	0000-0001-8045-9388	vera.rocca@polito.it
Bonano Manuela	6	0000-0001-8240-7629	bonano.m@irea.cnr.it
De Luca Claudio	6	0000-0002-5197-7503	deluca.c@irea.cnr.it
Lanari Riccardo	6	0000-0002-7296-2749	lanari.r@irea.cnr.it
Manzo Mariarosaria	6	0000-0002-9387-5273	manzo.mr@irea.cnr.it
Gandolfi Stefano	5	0000-0003-2096-5670	stefano.gandolfi@unibo.it
Macini Paolo	5	0000-0002-6851-3262	paolo.macini@unibo.it
Poluzzi Luca	5	0000-0001-8812-5235	luca.poluzzi5@unibo.it
Albano Matteo	4	0000-0003-2772-2401	matte.albano@ingv.it
Anderlini Letizia	4	0000-0002-9461-3320	letizia.anderlini@ingv.it
Avallone Antonio	4	0000-0002-0264-2897	antonio.avallone@ingv.it
Cavaliere Adriano	4	0000-0003-2888-324X	adriano.cavaliere@ingv.it
D'Agostino Nicola	4	0000-0002-0444-6240	nicola.dagostino@ingv.it
Devoti Roberto	4	0000-0002-0037-0074	roberto.devoti@ingv.it
Palano Mimmo	4	0000-0001-7254-7855	mimmo.palano@ingv.it
Pezzo Giuseppe	4	0000-0003-4851-4193	giuseppe.pezzo@ingv.it
Pietrantonio Grazia	4	0000-0002-0429-5120	grazia.pietrantonio@ingv.it
Polcari Marco	4	0000-0003-0506-3492	marco.polcari@ingv.it
Randazzo Daniele	4	0000-0002-1416-8950	daniele.randazzo@ingv.it
Riguzzi Federica	4	0000-0003-3453-5110	federica.riguzzi@ingv.it
Secreti Valeria	4	0000-0002-5564-5207	valeria.secreti@ingv.it
Selvaggi Giulio	4	0000-0001-7589-2937	giulio.selvaggi@ingv.it
Serpelloni Enrico	4	0000-0003-1822-403X	enrico.serpelloni@ingv.it
Sparacino Federica	4	0000-0002-7851-9545	federica.sparacino@ingv.it
Trasatti Elisa	4	0000-0002-2983-045X	elisa.trasatti@ingv.it
Severi Paolo	2		paolo.severi@regione.emilia-romagna.it
Perini Luisa	2		luisa.perini@regione.emilia-romagna.it

1. Ministero dello Sviluppo Economico – DGISSEG
2. Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Bologna
3. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma
4. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV
5. Università degli Studi di Bologna "Alma Mater Studiorum" – DICAM, Bologna
6. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Napoli
7. Ricerca Sistema Energetico - RSE, Milano
8. Politecnico di Torino, Torino
9. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Bologna
10. Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG), Roma Sapienza

* Affiliazione secondaria

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

Premessa

Il presente documento riporta in sintesi i risultati ottenuti dal progetto di ricerca interdisciplinare, denominato "Subsidenza", a cui hanno partecipato: MiSE; Regione Emilia-Romagna; Università degli Studi di Roma "La Sapienza"; Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV; Università degli Studi di Bologna "Alma Mater Studiorum" – DICAM; Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR IREA; Ricerca Sistema Energetico – RSE; Politecnico di Torino – Polo di Ricerca SEADOG.

La regione Emilia-Romagna, e il mare antistante le sue coste, ricadono nell'ambito di una zona geologica dinamica soggetta a diversi processi che concorrono al fenomeno della subsidenza naturale (Carminati et al., 2006), fenomeno che agisce su scale temporali molto lunghe, migliaia-milioni di anni. Negli ultimi 2500 anni si è osservato nel settore orientale della pianura Padana, una subsidenza naturale che si attesta su valori di 2-3 mm/a (Gambolati e Teatini, 1998). La subsidenza naturale della zona è riconducibile a due componenti principali:

- la dinamica delle placche, ovvero le deformazioni legate all'evoluzione della catena appenninica, di cui il bacino Adriatico centro-settentrionale costituisce l'avanfossa più recente;
- la compattazione dei depositi di riempimento del bacino padano, con particolare riferimento a quelli plio-pleistocenici, il cui spessore e il carico sedimentario sono esternamente variabili in funzione dell'assetto strutturale del substrato (da poche centinaia di metri, in corrispondenza delle pieghe, fino a 5000-6000 metri, nei depocentri).

La subsidenza rappresenta un fenomeno particolarmente critico per la fascia costiera regionale contribuendo ad accentuare i fenomeni di erosione costiera e ingressione marina che affliggono fortemente le coste regionali.

Numerosi studi e monitoraggi dei suddetti fenomeni sono stati effettuati da Università Enti di Ricerca e dalla Regione stessa, ciò che emerge è un rilevante abbassamento del suolo riconducibile ad una più intensa attività antropica dell'area nel corso del XX secolo. In particolare, nel settore del delta del Po l'estrazione di acque metanifere dal sottosuolo ha causato riduzioni della quota altimetrica localizzate di 2-3 m (tassi fino a 8 cm/anno dal 1938 al 1961 (Caputo et al., 1970; Corbau et al., 2019) e riduzioni fino a 1-2 metri nelle zone industriali di Ravenna e Cesenatico per effetto del prelievo di acque dal sottosuolo (Teatini et al. 2005). Le misure messe in atto dalla regione, in particolare le limitazioni sull'estrazione dell'acqua dal sottosuolo, hanno sensibilmente ridotto l'intensità della componente antropica del fenomeno, anche se, localmente ancora si osservano valori fino a 10-20 mm/a (Arpae - Regione Emilia-Romagna, 2018). Analogamente i recenti monitoraggi del fenomeno erosivo evidenziano che il 47% dei litorali regionali è in sofferenza (monitoraggio Arpae 2012-2018). Ulteriori studi regionali stimano che, dei 108 km di costa tra Cattolica e la foce del fiume Po di Volano, il 36% presenti un'elevata suscettibilità ai fenomeni di erosione costiera (classi 4 e 5), e il 35% alle inondazioni marine. Ciò è calcolato sulla base di parametri morfologici, circa il 40% delle spiagge (considerando solo la porzione libera da infrastrutture) ha una ampiezza inferiore a 50 metri, e più dell'80% ha un'elevazione media inferiore a 1.5 metri; parametri evolutivi quali la dinamica della linea di riva e dal livello di antropizzazione della costa (Perini et al., 2019).

Le diverse attività di monitoraggio delle dinamiche costiere portate avanti, evidenziano una rilevante incidenza della componente antropica a fenomeni quali l'erosione dei litorali, l'abbassamento del suolo, la riduzione dei sistemi naturali di difesa dall'ingressione marina e difficoltà di drenaggio. Da qui la volontà della Regione di intraprendere un sempre più sensibile programma di monitoraggio dell'uso del suolo.

È stato osservato che tra i diversi fattori potenzialmente rilevanti per la deformazione del suolo vi è certamente la forte urbanizzazione, aumentata del 400% in soli 65 anni (Perini e Calabrese, 2011) contestualmente legata alla riduzione dell'utilizzo agricolo del suolo (Figura1).

Nell'area prospiciente la costa, fenomeni potenzialmente rilevanti sono riconducibili allo sviluppo del sistema portuale, e l'aumento dei sistemi di difesa costiera rigida che attualmente interessa il 60% circa della costa regionale, e non ultimo lo sviluppo, a partire dagli anni 50 e 80, di attività minerarie (Coppi et al., 2017).

Al fine di delineare un quadro generale dell'evoluzione del fenomeno della subsidenza nella pianura alluvionale e costiera, a partire dagli anni '90 del secolo scorso, la Regione Emilia-Romagna ha realizzato cinque carte di sintesi (ARPAE, 2018); nonostante l'elevato livello di dettaglio, non risulta tuttavia semplice discriminare i diversi contributi, naturali e antropici, che incidono sui valori di subsidenza totale.

L'attuale Direzione Generale per le Infrastrutture e la Sicurezza dei Sistemi Energetici e Geominerari DG ISSEG (EX DGS UNMIG) del Ministero dello Sviluppo Economico, ha promosso, nell'ambito della rete di ricerca CLYPEA Innovation Network fo Future Energy, uno studio multidisciplinare per la valutazione delle deformazioni del suolo, con particolare riferimento alle attività connesse alla produzione di idrocarburi nell'area dell'offshore emiliano-romagnolo, per lo sviluppo di un piano di monitoraggio integrato. Lo studio "Progetto Subsidenza" è stato avviato nel 2018 e concluso nel 2020, al fine di meglio comprendere quanto le attività estrattive possano contribuire al fenomeno della subsidenza e di conseguenza poter programmare un monitoraggio sempre più efficace e una gestione più oculata delle attività.

Il progetto ha beneficiato della condivisione, da parte di ENI, di dati di giacimento indispensabili per la modellazione e i dati di monitoraggio (CGPS, INSAR, livellazioni) oltre ai dati geologici e di prelievo di acqua condivisi dalla Regione Emilia-Romagna.

Considerati i diversi fattori che concorrono al fenomeno della subsidenza in queste aree, lo studio si è concentrato sulla caratterizzazione delle sole componenti relative a prelievi di acqua a diversi scopi e ad estrazione di gas attraverso l'individuazione di due casi studio. L'obiettivo principale del progetto è quello di identificare dei metodi di misura e di metodologie multidisciplinari di analisi adeguate al monitoraggio della subsidenza dovuta ad attività di produzione di idrocarburi.

Si ricorda a tal proposito, che nell'ambito delle sue competenze in un'ottica di prevenzione, la DGS-UNMIG già effettua una puntuale verifica dei rapporti annuali inviati dalle Società in ottemperanza dei D.M. di conferimento delle licenze e delle prescrizioni di VIA, per il controllo degli effetti delle operazioni di estrazione di idrocarburi sulla subsidenza. In particolare, in questa zona, il controllo viene effettuato su 10 concessioni di coltivazione (dato DGS-UNMIG, 2018), attraverso la definizione del grado di coerenza (basso, medio, alto) tra le misure eseguite con stazioni Continuous GPS (CGPS) e i modelli previsionali di subsidenza realizzati dai concessionari. In prospettiva è però importante ottenere un dato di misura più accurato possibile ed effettuare una modellazione adeguata considerando i fattori più impattanti sulla deformazione del suolo attraverso una metodologia di monitoraggio replicabile e approvata da diversi soggetti (enti di ricerca e/o amministrazioni).

Il progetto Subsidenza è nato con l'intento di promuovere azioni concrete nell'ambito della collaborazione tra Ministero e Regione Emilia-Romagna istituitasi formalmente attraverso la sigla dell'"Accordo Offshore" nel 2016. L'accordo, fra le altre attività prevedeva all'art. 3 lettera a) lo studio della situazione regionale attraverso accurate previsioni modellistiche della subsidenza, utilizzando i dati della rete regionale e quelli ricavabili dalle postazioni delle piattaforme.

Scelta dell'area di studio

L'obiettivo del progetto è la definizione di buone pratiche per il monitoraggio integrato e interdisciplinare della subsidenza onshore anche al fine di verificare l'applicabilità degli "Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro" (Dialuce et al., 2014) nelle aree offshore.

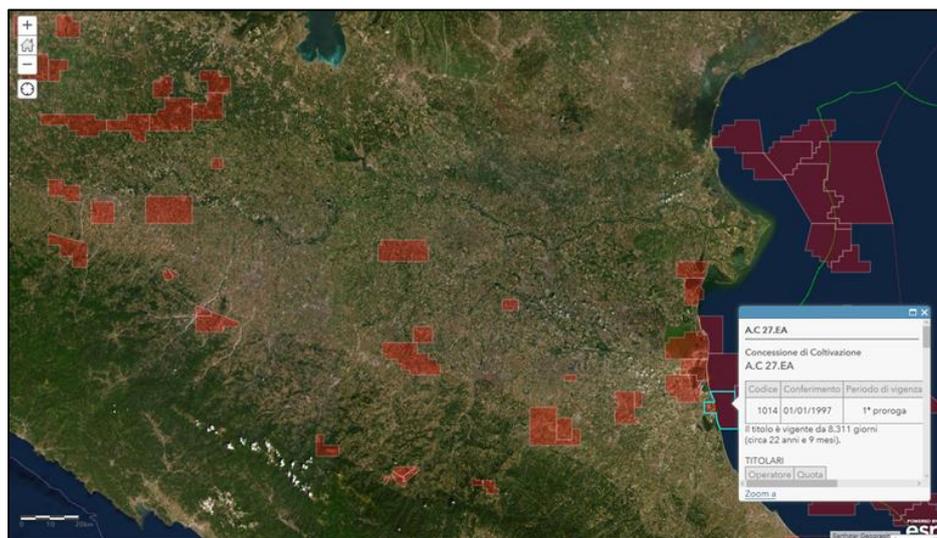
L'area di studio è stata scelta in base ai seguenti criteri:

- vicinanza alla costa;
- fenomeno di subsidenza associato;
- presenza di fattori di rischio costiero (erosione e fenomeni di inondazione marina), in base alla ricorrenza di **mareggiate**, zone di potenziale **inondazione** (in accordo con la direttiva alluvioni – d.lgs. 49/2010), la classe di **indice di suscettibilità della costa** al fenomeno dell'erosione;
- disponibilità di studi e dati misurati ad esempio da GPS, livellazioni e INSAR.

In funzione di tali criteri è stata scelta come area di studio la zona del Ravennate e l'intorno della concessione A.C 27.EA, situata nella fascia costiera emiliano romagnola, con particolare riferimento alla zona del Lido di Dante, Lido Adriano e Fiumi Uniti, oltre l'area del Mar Adriatico centro-settentrionale (vedi Figura 1 a, b).



a)



b)

Figura 1 - Rappresentazione dei due casi studi individuati. a) Area con estensione 12,5 x 12,5 km situata tra Comacchio al nord e Ravenna al sud; il poligono blu racchiude i pozzi per l'estrazione di acqua utilizzati per lo studio (da Antoncecchi et al., 2020). b) Area di studio esaminata che comprende la Regione Emilia-Romagna con particolare riferimento alla zona del Lido di Dante e Lido di Adriano e area del Mar Adriatico centro-settentrionale. In rosso sono rappresentate le concessioni di coltivazione di idrocarburi, in verde la linea delle 12 miglia dalla linea di costa e dalle aree protette. La scheda riporta i dettagli tecnici della concessione A.C. 27 EA (da webGis MiSE).

Nell'area, infatti, la concessione A.C. 27 EA è a cavallo della linea di costa con un giacimento che si estende in parte anche a terra. L'indice di erosione nell'area tra Lido di Dante e Fiumi Uniti è in classe 4-5 con possibili frequenti eventi di inondazione in 10 anni (Figura 2). Sempre nell'area vi è la contemporanea presenza di stazioni di misura: in particolare sono presenti due stazioni GPS a S e a N di Ravenna, "Fiumi Uniti" e "Dosso degli Angeli", la rete di livellazione dell'ENI lungo tutto il tratto di costa considerato e il dato INSAR.

Inoltre, l'area tra Ravenna e Comacchio è stata scelta come altro sito di studio, nell'ambito del progetto, per gli effetti indotti dall'estrazione di acqua dal sottosuolo, a diversi scopi, per la contemporanea presenza del dato piezometrico e dei volumi di acqua estratta da ciascun pozzo analizzato per un range temporale significativo.



Figura 2 – Frequenza di inondazione e indici di suscettibilità all’erosione per la zona Lido Adriano e Lido di Dante (area costiera di Ravenna).

Linee di ricerca sviluppate

Le linee di ricerca (L) sviluppate nel corso del progetto sono le seguenti:

1. ricostruzione di una banca dati di sottosuolo e modello geologico 3D della Pianura Padana (Università Sapienza – CNR IGAG – Politecnico di Torino);
2. analisi dei dati CGPS offshore, del tasso di deformazione tettonica in Adriatico settentrionale (Università Sapienza e INGV);
3. analisi delle deformazioni superficiali onshore e offshore attraverso dati satellitari ERS-1/2, ENVISAT e Sentinel-1 e tecniche di Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (CNR IREA);
4. studio dei metodi geodetici di misura e calcolo avanzato per il monitoraggio onshore e possibile estensione ad aree marino costiere (INGV e Università di Bologna);
5. modellazione statica e fluidodinamica nell'onshore Ravennate per i prelievi di acqua e nell'Adriatico settentrionale per l'estrazione di gas da una concessione scelta come caso di studio (RSE S.p.A.);
6. misure e modellazione delle deformazioni del suolo in aree interessate da attività di estrazione di idrocarburi: l'esempio dell'area costiera ravennate, nell'Alto Adriatico (INGV).

Linea di ricerca 1 - Ricostruzione di una banca dati del sottosuolo italiano e modello geologico 3D della Pianura Padana (Università Sapienza – CNR IGAG – Politecnico di Torino)

La presente ricerca è il frutto della collaborazione tra la Sapienza Università di Roma e il Politecnico di Torino. Il progetto si pone l'obiettivo di approfondire le conoscenze geologiche e strutturali del sottosuolo italiano, con un particolare focus sulla Pianura Padana. Il progetto si articola in due parti mutuamente interconnesse. La prima parte consiste nella costruzione di una banca dati di natura geologica, geofisica e strutturale nonché di dati di pozzo per l'intero territorio nazionale, e informazioni petrofisiche, in particolare per la Pianura Padana. Sulla base di queste informazioni, si è proceduto alla realizzazione di un modello geologico 3D atto a riprodurre le principali caratteristiche geologiche della Pianura Padana che verrà integrato successivamente con le proprietà meccaniche delle unità geologiche ricostruite attraverso i dati estrapolati dai pozzi. Il modello regionale costituisce il punto di partenza per future analisi sismologiche e per simulare il comportamento del flusso dei fluidi nel sottosuolo e le variazioni deformative ad esso associate, nell'ottica di valutare l'impatto e la sicurezza delle attività antropiche.

Costruzione banca dati del sottosuolo per l'intero territorio italiano

Il progetto ha previsto la creazione di un database di dati di sottosuolo e di pericolosità di fondale in relazione alla sicurezza degli impianti per estrazione di idrocarburi che insistono nelle aree marine e anche in Pianura Padana. Tale database, che si prevede di aggiornare con continuità e integrare anche con dati di diversa natura, permette di gestire dati riguardanti la sicurezza delle aree marine italiane, in particolare delle aree dove insistono impianti di ricerca e coltivazione di idrocarburi, integrandoli con informazioni geologiche e geofisiche di sottosuolo (profili sismici a riflessione, sezioni geologiche, pozzi ecc.).

Tra le attività svolte si segnala la raccolta e immissione nel database dei dati di sottosuolo per il Mar Ionio, il Canale di Sicilia e Mare Adriatico e la Pianura Padana. Un esempio dei dati raccolti è riportato nelle Figure L1-1 e L1-2.

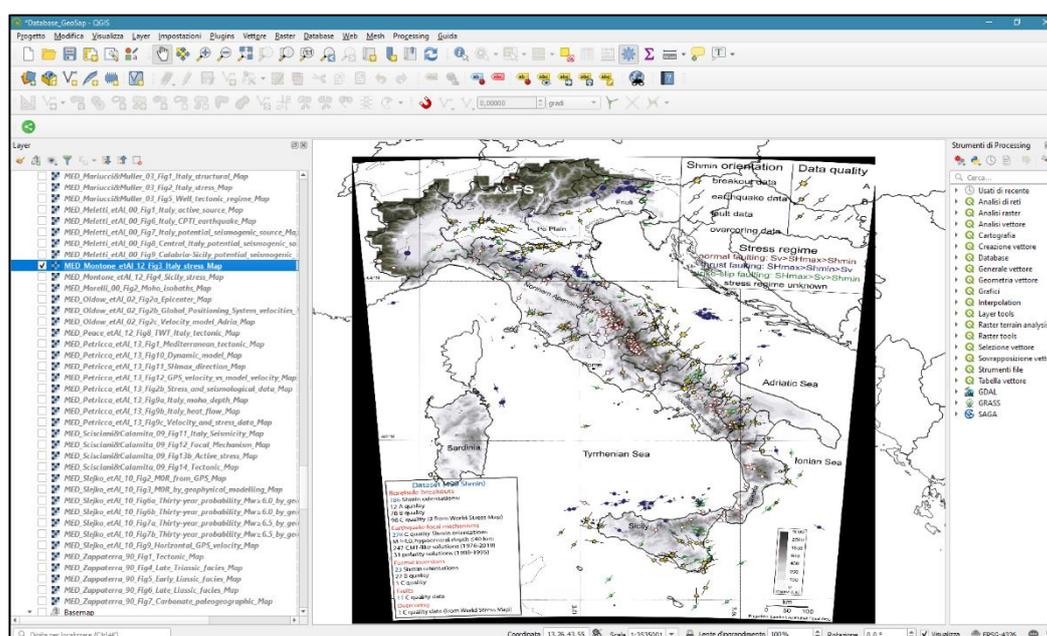


Figura L1-1 – Esempio di una mappa di letteratura georiferita in QGIS (Montone et al., 2012).

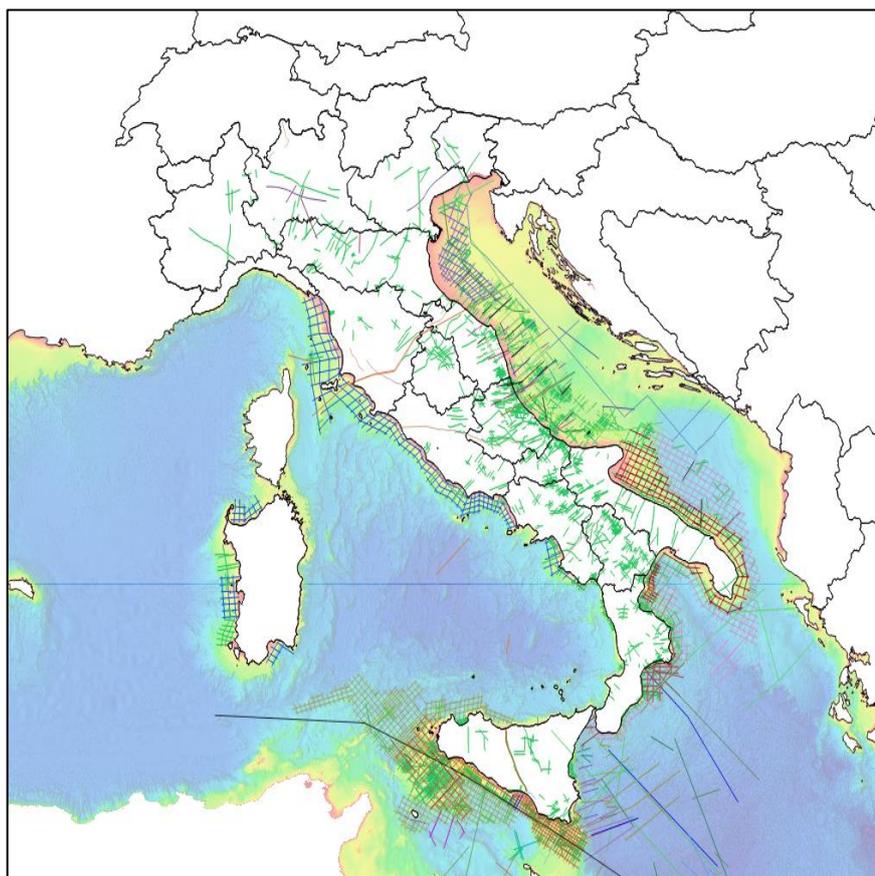


Figura L1-2 – Mappa dell’ubicazione delle linee sismiche *off-shore* e *on-shore* per l’intero territorio italiano reperite da letteratura e dal sito Videpi.

I dati di sottosuolo sono stati reperiti attraverso un’attenta analisi bibliografica e, una volta codificati per rendere il database omogeneo, organizzati in un database geografico digitale (GIS).

Successivamente i dati sono stati inseriti nel *software* Schlumberger Petrel™ che permette di gestire e analizzare congiuntamente dati di diversa natura direttamente in un ambiente 3-D. Parte dei dati raccolti potranno essere selezionati e inseriti in un portale webgis.

Numerosi sono i dati inseriti all’interno del database GIS sia in formato raster che in formato vettoriale. Tra i dati che sono stati raccolti troviamo principalmente profili geologici, sezioni sismiche (Figura L1-2), dati di sismicità, elementi strutturali e numerose carte tematiche (mappe geologico-strutturali, mappe delle isopache, mappe sismo-tettoniche, mappe paleogeografiche e molto altro). I dati raccolti sono stati importati nel *software* QGIS utilizzando come sistema geografico di riferimento il WGS84, identificato dal codice EPSG 4326.

Sono stati importati più di 350 raster cartografici, oltre 55 basemap necessarie per la definizione delle tracce dei profili geologici e delle linee sismiche. Inoltre, alcuni dati sono stati digitalizzati per poterli successivamente importare in ambiente 3-D. Sono stati digitalizzate più di 50 carte di letteratura con elementi strutturali, oltre 20 carte delle isobate e isocrone di varie superfici e sono state inoltre elaborate le tracce dei profili geologici e linee sismiche presenti in più di 80 lavori di letteratura.

Il *software* Petrel™ è stato utilizzato per visualizzare ed elaborare i dati in ambiente 3-D. Questo *software* gestisce dati in ambiente 3-D e permette di ricostruire modelli geologici complessi attraverso l’integrazione di numerosi dati di natura geologica e geofisica.

Lo stesso *software* è stato utilizzato per la gestione completa di tutti i dati geologici (ad es. mappe digitalizzate delle isobate, dati di pozzo, profili geologici e linee sismiche ecc.) offrendo la possibilità di un immediato confronto in ambiente 3-D dei dati geologici insieme a dati di pericolosità oltre che fornire una base di informazioni di notevole importanza per futuri lavori legati ai rischi naturali nell’*off-shore* italiano.

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

Un esempio dei dati che sono stati inseriti ed elaborati in ambiente 3-D è riportato in Figura L1-3 e L1-4. I dati precedentemente digitalizzati in GIS, opportunamente elaborati e revisionati, sono stati importati in Petrel e poi interpolati per creare le superfici di riferimento (Figura L1-4).

Attraverso i dati raccolti, digitalizzati e interpolati sarà poi possibile ricostruire e analizzare nel dettaglio l'ambiente tettonico nel quale insistono le infrastrutture e quindi il potenziale rischio.

Questo progetto di collezione e catalogazione di dati di sottosuolo, oltre il processo di analisi e modellazione del dato in 3-D è stato esteso alla Pianura Padana dove numerosi dati di sottosuolo sono stati raccolti, georiferiti, revisionati e infine integrati per creare un modello geologico di sottosuolo.

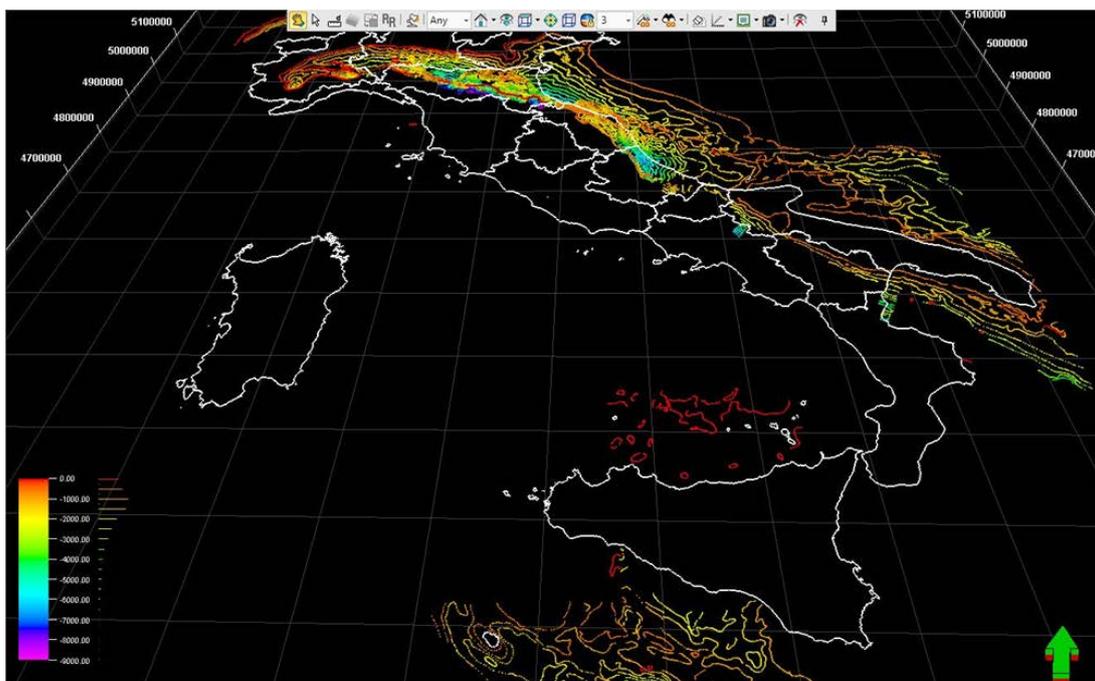


Figura L1-3 - Isobate della Base Pliocene (Bigi et al., 1992) importate in Petrel.

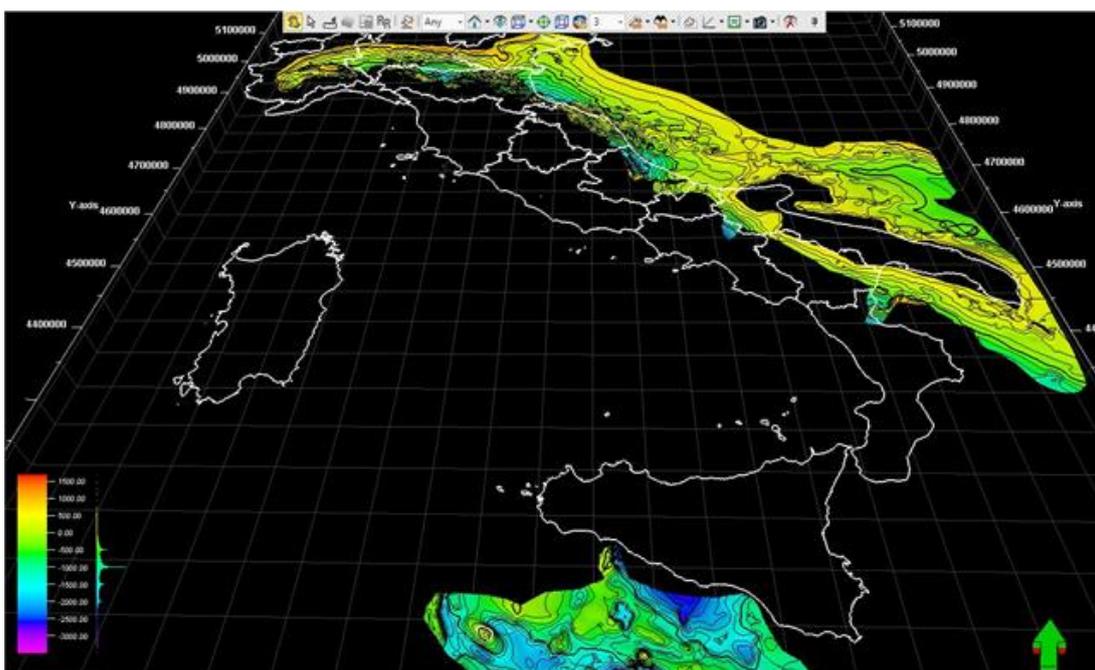


Figura L1-4 – Superficie della base del Pliocene interpolata.

Modello geologico 3D della pianura Padana

La costruzione del modello geologico 3D della Pianura Padana è stata realizzata grazie all'integrazione delle competenze e delle informazioni disponibili presso l'Università Sapienza di Roma e il Politecnico di Torino e rappresenta il risultato della digitalizzazione, analisi integrata ed elaborazione di dati di pozzo, di sezioni geologiche, di carte geologiche e di dati disponibili nella letteratura settore. Le principali fonti utilizzate sono state articoli tecnici e banche dati pubbliche (Progetto ViDEPI, <http://www.videpi.com/videpi/videpi.asp>; Archivio nazionale indagini del sottosuolo, banche dati ISPRA: <http://portalesgi.isprambiente.it/it/categorie-db/sondaggi>). Numerose sezioni geologiche sono state raccolte da lavori di letteratura (a titolo di esempio citiamo i lavori di Cassano et al., 1986; Fantoni & Franciosi, 2009 e Livani et al., 2018). Le loro tracce sono state georeferenziate e digitalizzate con l'utilizzo di *software* in ambiente GIS. Successivamente le sezioni sono state confrontate tra di loro (Figura L1-5) e, in alcuni casi, sono state riposizionate nel rispetto dei vincoli forniti da loro eventuali intersezioni, dalla geologia superficiale, dagli elementi orografici e idrografici, dai confini amministrativi, ecc.

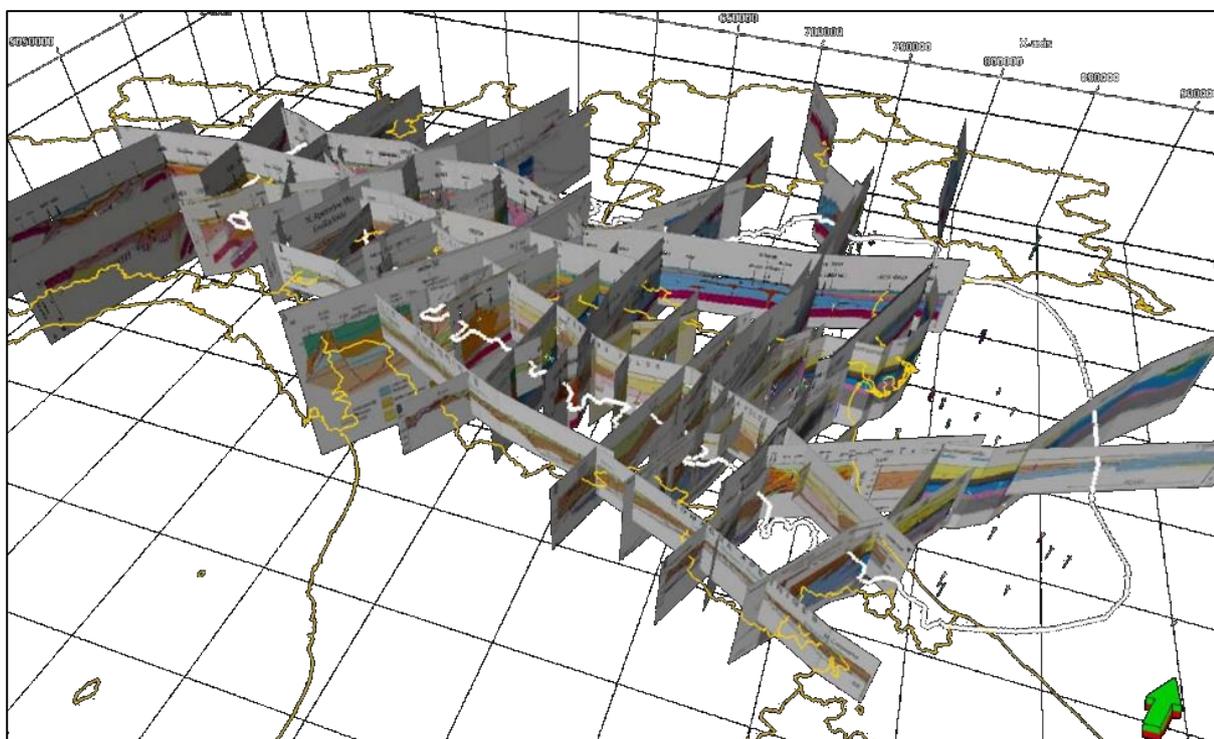


Figura L1-5 – Mappa dell'ubicazione delle sezioni geologiche utilizzate per la costruzione del modello geologico 3D della pianura Padana.

I dati ottenuti da misure in pozzo (*well logs*) derivano in parte da sondaggi profondi, perforati per scopi esplorativi e minerari, e in parte da indagini superficiali del sottosuolo. Le misure effettuate nei pozzi profondi sono disponibili nella banca dati ViDEPI dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse del Ministero dello Sviluppo Economico (Figura L1-6). Per ogni pozzo presente nella zona di studio sono stati digitalizzati i log di potenziale spontaneo (SP) o *Gamma Ray* (GR), che sono in grado di fornire informazioni sulle caratteristiche litologiche del sottosuolo, e i log acustici (*Sonic log*) che registrano il tempo di propagazione delle onde acustiche nella formazione. Successivamente sono stati definiti nuovi log di litofacies (che consentono di descrivere i tipi litologici intercettati dal pozzo), log di mineralizzazione e log di velocità della propagazione delle onde sismiche primarie (P) (Figura L1-7). Questi dati sono stati utilizzati per la caratterizzazione litologica dei pozzi, per il calcolo della velocità delle onde sismiche primarie (P), per l'identificazione degli intervalli mineralizzati, per la correlazione stratigrafica (Figura L1-8),

per la definizione dell'estensione delle principali formazioni geologiche e della geometria del modello geologico 3D a scala regionale. Inoltre sono state utilizzate le informazioni relative ad alcuni tagli stratigrafici superficiali ottenuti dai sondaggi superficiali e disponibili nell'archivio Nazionale delle Indagini sul Sottosuolo.

Le mappe geologiche utilizzate per la costruzione del modello 3D della Pianura Padana sono: la mappa strutturale dell'Italia, che include la mappa in profondità della base del Pliocene (Bigi et al., 1990a; 1990b) e la mappa delle isobate del top della successione carbonatica (Casero et al., 1990). Queste mappe sono state georeferenziate e caricate nel *software* Petrel™.

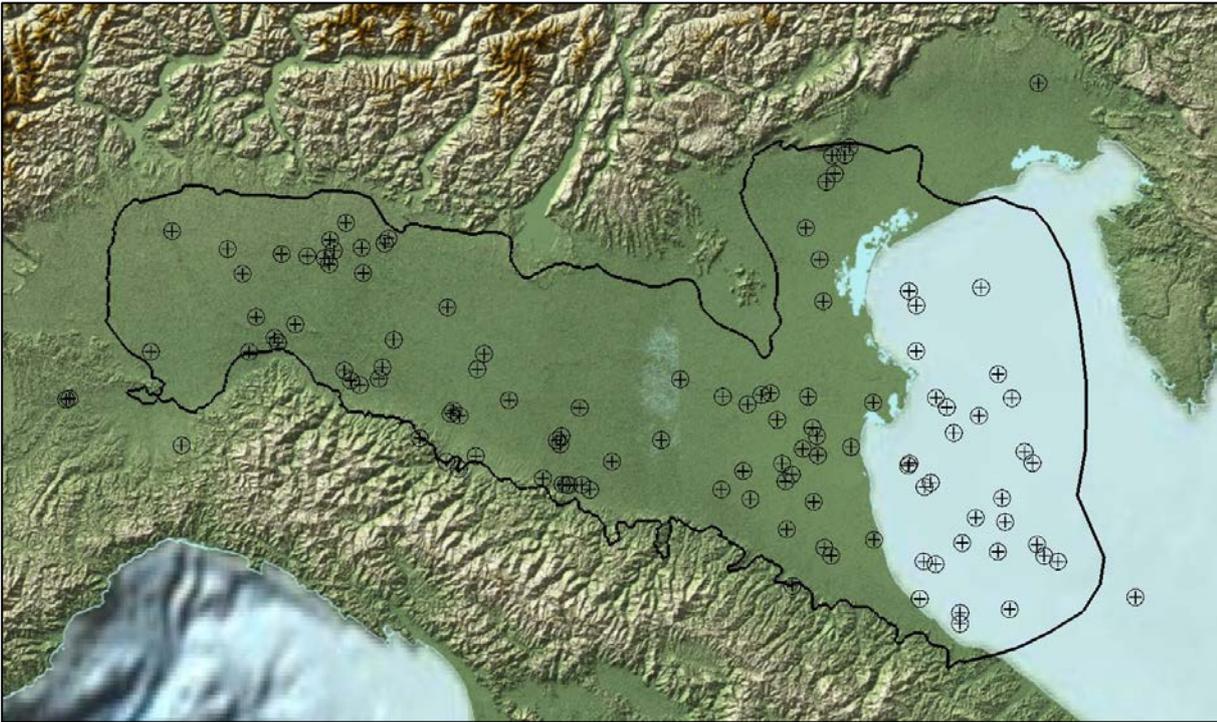


Figura L1-6 –Ubicazione dei pozzi *off-shore* e *on-shore* in cui sono disponibili misure di log sonico, disponibili nella banca dati del progetto Videpi. Il poligono nero definisce l'estensione del modello geologico 3D.

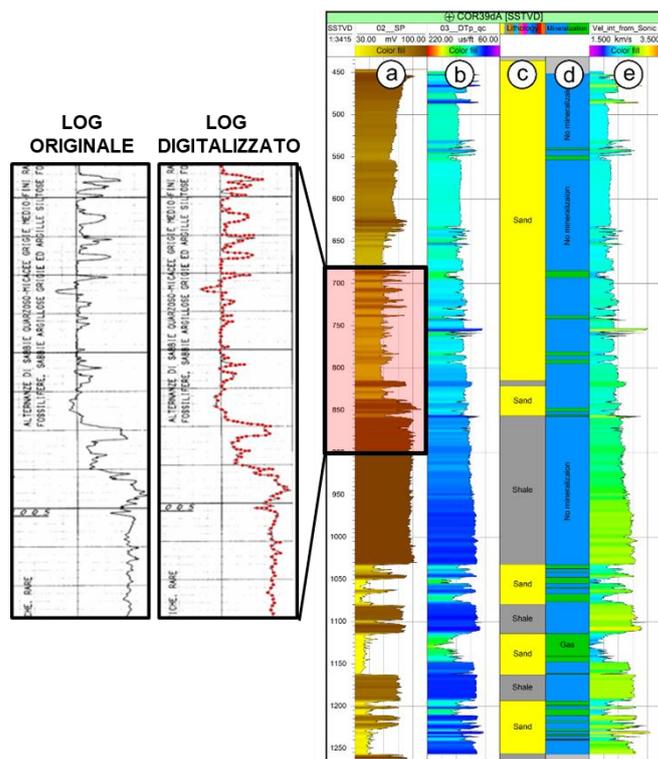
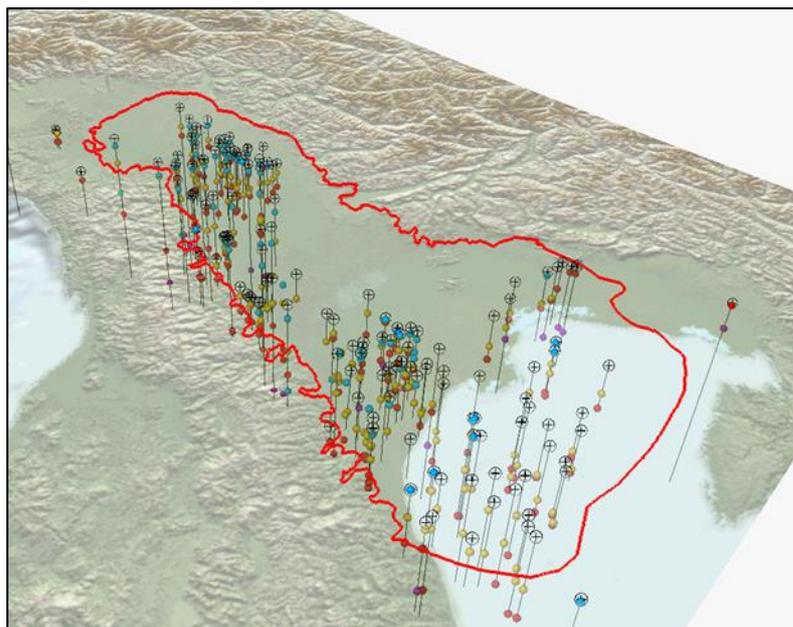
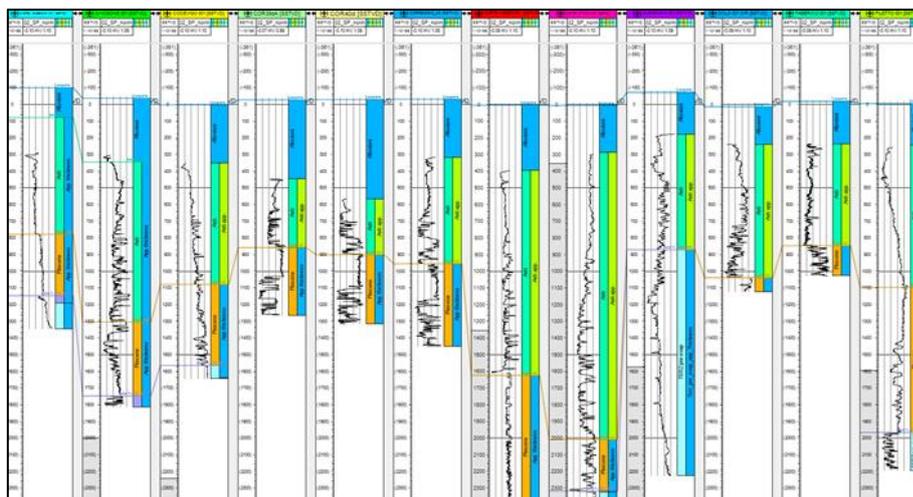


Figura L1-7 – Esempio del set di log definiti per tutti i pozzi inclusi nel dataset del progetto. Esempio del pozzo Correggio 39dirA. a) log di potenziale spontaneo (SP) normalizzato, b) log Sonico, c) log di litologie, d) log di mineralizzazione, e) log di velocità.

I dati raccolti erano originariamente in formato cartaceo (ad es. sezioni trasversali e mappe geologiche), digitale e / o vettoriale, come shapefile di punti e linee. Pertanto, la loro integrazione in un unico dataset coerente ha richiesto una fase preliminare di controllo di qualità ed eventuale intervento migliorativo. Successivamente i dati sono stati resi omogenei in termini di stratigrafia ed età geologica. Inoltre, è stato necessario georeferenziare tutti i dati ad un comune sistema di riferimento spaziale (WGS84-UTM32N; EPSG: 32632) utilizzando il *software* QGis, versione 2.18.16. Il dataset finale comprende: 48 sezioni geologiche e le loro mappe di localizzazione; 2 carte geologiche e i log di 190 pozzi. Infine, tutti i dati processati e georeferenziati sono stati caricati nel *software* Petrel™ per la successiva fase di modellazione.



(a)



(b)

Figura L1-8 – (a) Mappa 3D dei tagli stratigrafici selezionati (sfere colorate) lungo le traiettorie dei pozzi presenti nel progetto. (b) Esempio di correlazione stratigrafica tra i pozzi.

Una volta inseriti i dati nel database 3D, si è passati alle fasi di digitalizzazione ed elaborazione dei dati descritti nei paragrafi precedenti (i.e.: log di pozzo, sezioni geologiche, orizzonti digitalizzati ecc.), finalizzate alla realizzazione del modello geologico 3D dell'area di studio. Il modello comprende 4 sotto-volumi che, dall'alto verso il basso, rappresentano i seguenti intervalli stratigrafici:

- depositi alluvionali quaternari;
- sabbie pleistoceniche astigiane;
- sabbie plioceniche (es. Arenarie di Santerno, Porto Corsini e Porto Garibaldi);
- sabbie superiori Formazioni silicoclastiche dall'Eocene al Messiniano (es. Marne Gonfolite-Gallare, Marnoso Arenacea Fm., Marne San Donà, Glauconie di Cavanella Fm., Fusignano Fm., Sergnano, ecc.).

Il modello 3D è delimitato superiormente dalla superficie topografica e inferiormente dalla parte superiore della successione carbonatica. I diversi sotto-volumi, dall'alto verso il basso, sono delimitati dai seguenti orizzonti principali:

- la base dei depositi alluvionali;
- la base del Pleistocene;
- la base del Pliocene;
- Il top della successione carbonatica (Scaglia Calcarea, Eocene medio-inferiore).

La scelta di queste superfici e di questi orizzonti deriva dalla necessità di selezionare unità che, a grande scala, mostrino un comportamento meccanico omogeneo e che siano litologicamente simili. In tal modo, nella successiva fase di modellazione geomeccanica, sarà possibile utilizzare volumi di roccia già distinti in base alla loro consistenza in termini di parametri geomeccanici.

Per il top della successione carbonatica e per la base Pliocene è stato possibile integrare i dati derivanti dalle sezioni geologiche con i dati digitalizzati rispettivamente della mappa delle isobate di Casero et al. (1990) e Bigi et al. (1992). L'integrazione con questi set di punti ha permesso così di coprire aree prive di sezioni geologiche.

In seguito, sono stati estratti i tagli formazionali relativi ai 4 orizzonti dai dati di pozzo, ottenendo così 4 ulteriori file di punti, uno per ogni orizzonte stratigrafico, i quali sono stati successivamente combinati con i file di punti sopra menzionati (Figura L1-9).

La fase finale della modellazione geologica 3D è consistita nell'interpolazione dei set di punti completi, ottenendo così per ogni orizzonte stratigrafico la relativa superficie 3D (Figura L1-10). L'algoritmo di interpolazione usato è il "*convergent interpolation*" e le superfici hanno un passo di griglia di 500 m per lato.

Nella creazione delle superfici non si è tenuto conto delle strutture tettoniche; di conseguenza le superfici non presentano punti di rottura in corrispondenza delle faglie.

È stato fatto un quality check delle superfici create e, dove necessario, corrette e modificate manualmente o con gli strumenti forniti dal software.

Il lavoro descritto in precedenza ha permesso di realizzare un modello 3D del sottosuolo della Pianura Padana in cui il volume di rocce è stato suddiviso in diverse unità geologiche e rappresenta la base per la successiva modellazione geomeccanica dell'area in esame.

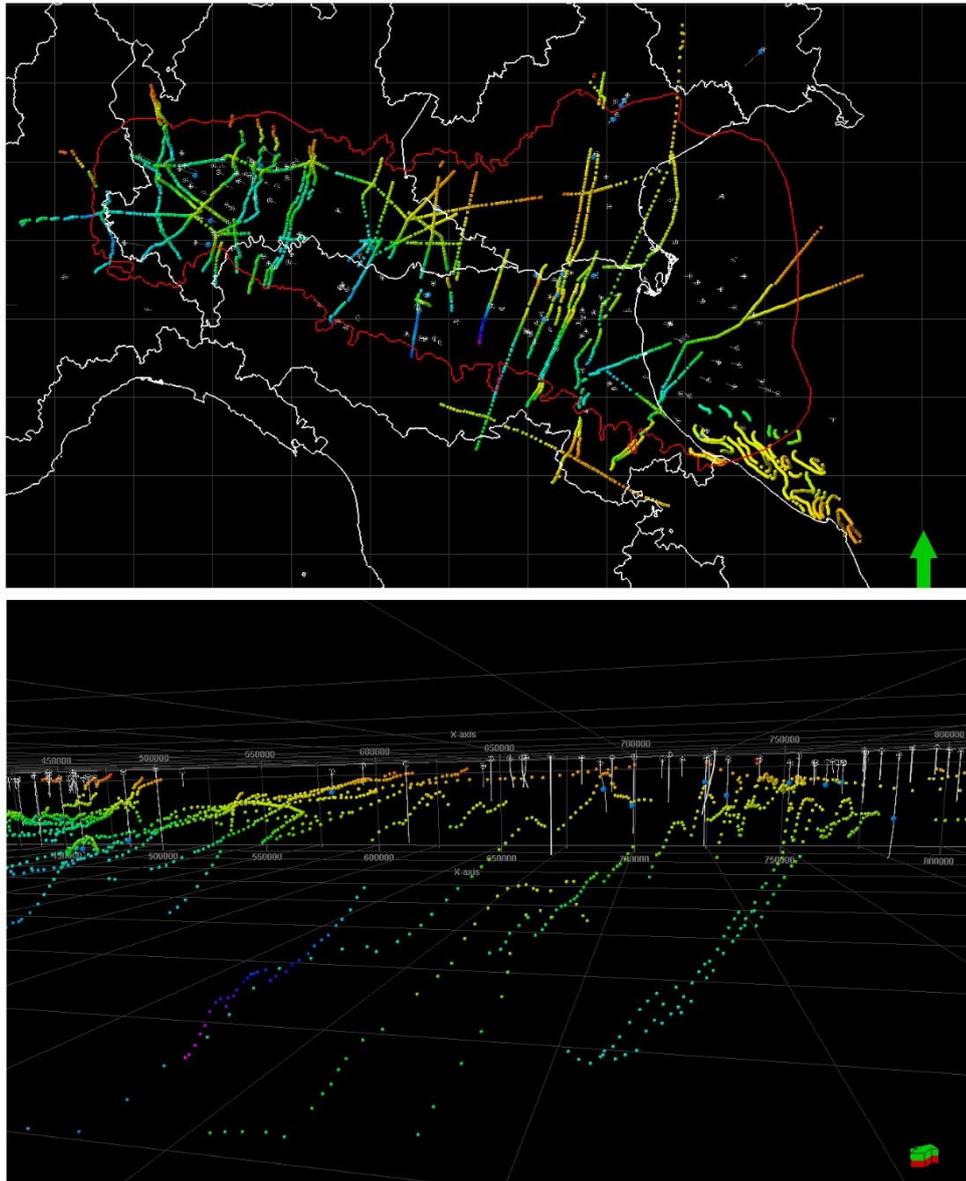


Figura L1-9 - Esempio dei dati utilizzati per costruire le superfici geologiche. Visione in mappa e 3-D dei dati del top del carbonatico digitalizzati dalle sezioni geologiche, dai tagli formazionali dei pozzi e dalle isobate di carte geologiche.

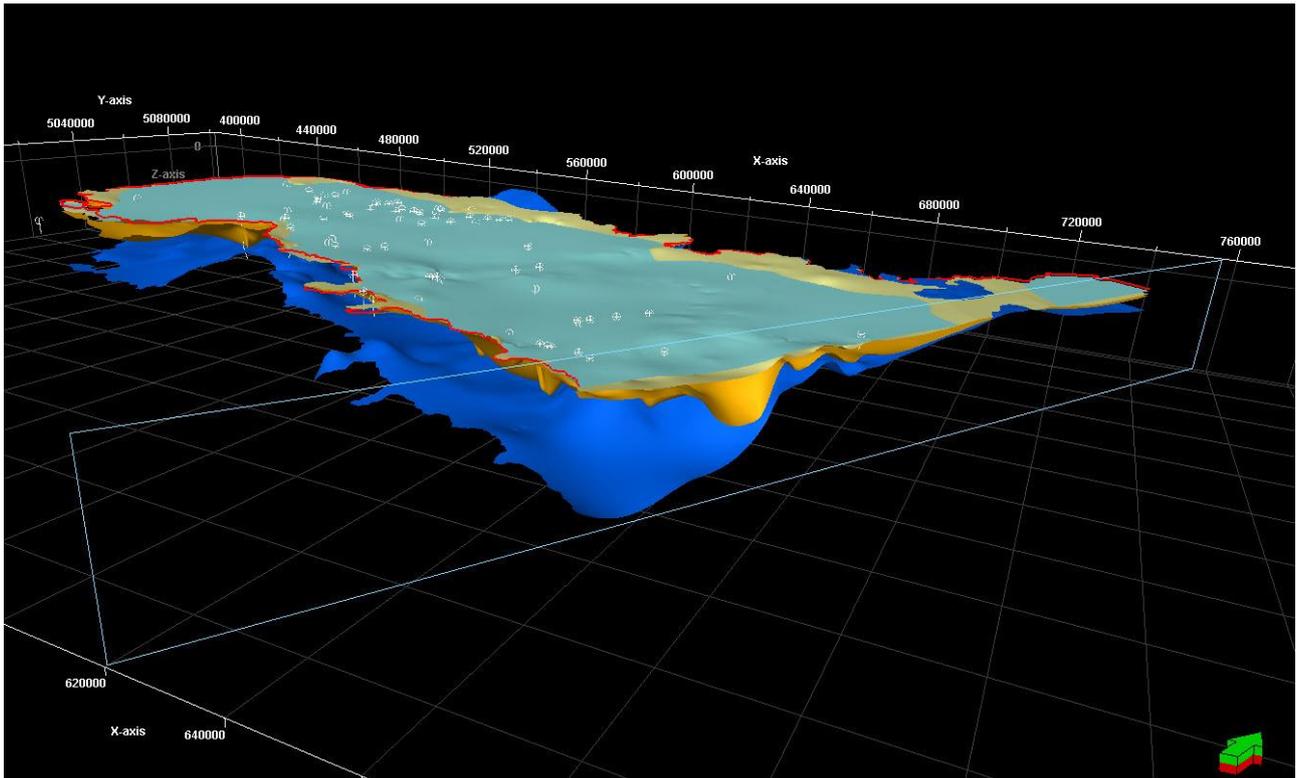


Figura L1-10 - Visualizzazione 3-D delle superfici modellate (dall'alto verso il basso: base delle alluvioni (celeste), base del Pleistocene (giallo), base del Pliocene (arancione), top della successione carbonatica (blu)).

Linea di ricerca 2 - Analisi dei dati CGPS offshore, del tasso di deformazione tettonica in Adriatico Settentrionale (Università Sapienza e INGV)

Nell'ambito della Linea di ricerca 2, è stato svolto uno studio della tettonica nell'Adriatico Settentrionale utilizzando un approccio multidisciplinare basato sull'integrazione di dati di deformazione del suolo GPS e dati di sottosuolo provenienti dall'interpretazione di linee sismiche. Infatti i dati GPS acquisiti in continuo permettono di quantificare la deformazione attiva in aree sismicamente attive (Devoti et al., 2008; Bennet et al., 2012; D'Agostino 2014; Kreemer et al., 2014; Hammond et al., 2016), fornendo un contributo fondamentale per la valutazione della pericolosità sismica (Riguzzi et al., 2012; Bird et al., 2010; Bird et al., 2015; Gualandi et al., 2017). L'assenza di disponibilità di dati di deformazione crostale nelle aree marine, come l'offshore adriatico, si riflette in una quantificazione approssimativa della pericolosità sismica nelle aree costiere. Nell'Adriatico settentrionale l'assenza di dati GPS non ha permesso, fino a questo momento, di vincolare in maniera univoca l'attuale deformazione crostale lasciando un dibattito aperto circa l'attività o meno delle strutture tettoniche compressive più esterne della catena appenninica, ubicate sotto il fondale adriatico (Argnani, 1998; Coward et al., 1999; Frepoli & Amato, 2000; Di Bucci & Mazzoli, 2002; Vannoli et al., 2004; Basili & Barba, 2007; Kastelic et al., 2013) (Figura L2-1). Inoltre i dati geodetici disponibili nel settore onshore non permettono l'identificazione di eventuali importanti gradienti di deformazione, tipici delle aree tettonicamente attive (Doglioni et al., 2015). Conseguentemente, nonostante siano state individuate strutture tettoniche simili a quelle degli adiacenti settori attivi dell'Appennino e nonostante i cataloghi sismici storici (Rovida et al., 2020) e strumentale (<http://terremoti.ingv.it/>), per l'area oggetto di studio non sono catalogate sorgenti sismogenetiche (Figura L2-2; Diss Working Group, 2018).

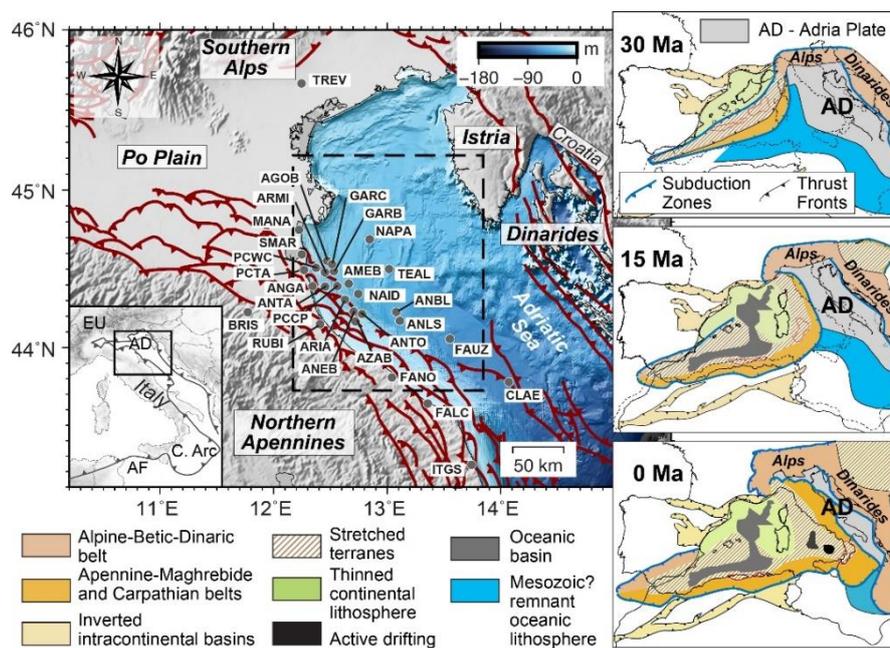


Figura L2-1 - Assetto generale dell'aria di studio e ubicazione delle stazioni CGPS (punti grigi) nel nord della placca Adria (AD), nel contesto strutturale proposto da Fantoni e Franciosi nel 2009 (segmenti in rosso). La batimetria ad alta risoluzione è estratta dal database Emodnet (<http://www.emodnet.eu/>). Il riquadro tratteggiato indica l'area riportata in Figura L2-2. Nel riquadro sono schematizzate la placca Africa (AF), Eurasia (EU) e l'arco calabro (C. Arc). A destra è riportata una ricostruzione dell'evoluzione tettonica dell'area mediterranea negli ultimi 30 Ma modificata da Carminati et al. (2010). La Figura è estratta da Pezzo et al. (2020).

Scopo di questa linea di ricerca è quindi quello di contribuire a riempire questo gap, integrando dati geologici di sottosuolo con dati geodetici offshore forniti da Eni S.p.A. per le finalità del progetto. L'integrazione e l'interpretazione di questi dati ha permesso di sviluppare modelli analitici, utili a valutare e quantificare il contributo delle principali strutture tettoniche alla deformazione crostale.

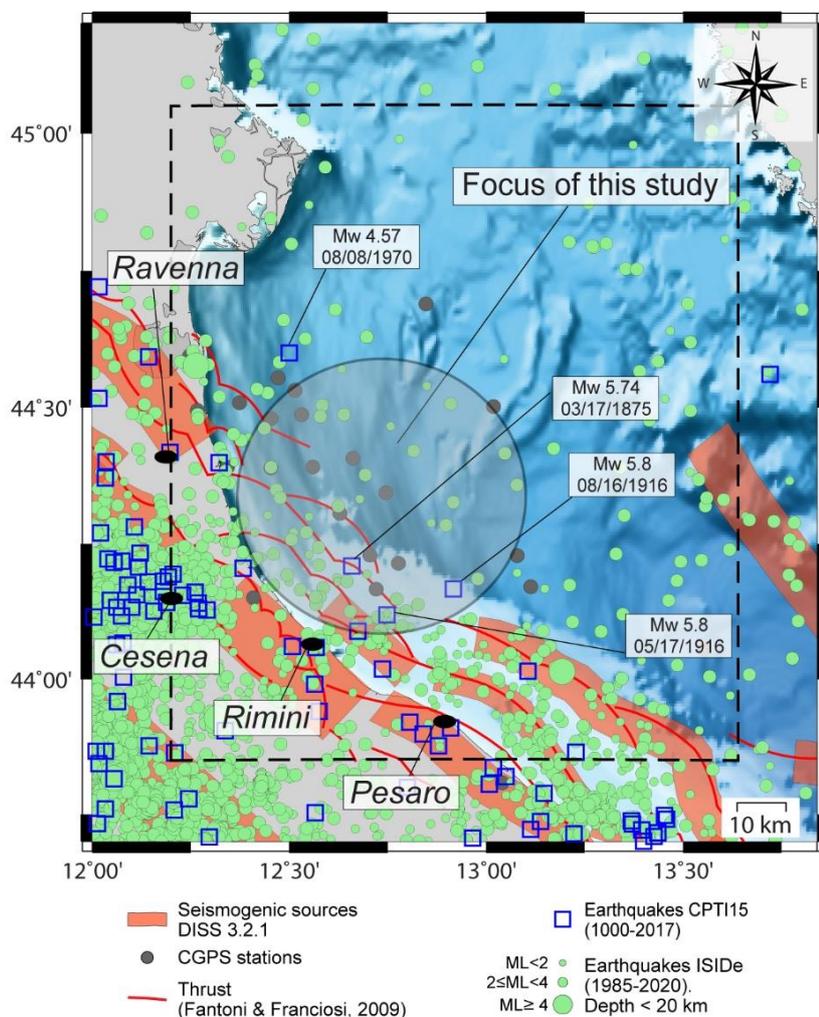


Figura L2-2 - Sorgenti sismogenetiche (<http://diss.rm.ingv.it/diss/>), sismicità storica (<https://emidius.mi.ingv.it/>) e strumentale <20 km (<http://terremoti.ingv.it/>) dell'area dell'Adriatico settentrionale. Il riquadro tratteggiato indica l'area rappresentata in Figura L2-3a. Figura estratta da Pezzo et al. (2020).

Dati geologici di sottosuolo

Dati geologici e geofisici sono stati integrati per definire correttamente l'assetto strutturale della zona di studio. I dati raccolti derivano principalmente dal database pubblico ViDEPI (<http://www.videpi.com>) e consistono principalmente in profili di sismica a riflessione derivanti dalla zona mineraria A (Adriatico settentrionale), dati di pozzo, carte strutturali delle isocrone (Figura L2-3). I profili di sismica a riflessione sono stati organizzati in un progetto Move® che è stato reso disponibile in una banca dati presso il GFZ [http://pmd.gfz-](http://pmd.gfz-potsdam.de/panmetaworks/review/aaf30ce1d97be14e03c64b5a638334ed0c40007bc91f6029b83a149727f47c5f)

[potsdam.de/panmetaworks/review/aaf30ce1d97be14e03c64b5a638334ed0c40007bc91f6029b83a149727f47c5f](http://pmd.gfz-potsdam.de/panmetaworks/review/aaf30ce1d97be14e03c64b5a638334ed0c40007bc91f6029b83a149727f47c5f), (Maffucci et al., 2020). Inoltre numerosi profili sismici, carte geologiche e profili geologici sono stati collezionati da dati di letteratura (Bally et al., 1986, Argnani, 1998; Franciosi & Vignolo, 2002; Casero et al., 2004; Finetti & Del Ben, 2005; Fantoni & Franciosi, 2009; Kastelic et al., 2013; Wrigley et al., 2015).

La qualità dei profili sismici raccolti è spesso disomogenea, questo perché i dati sono stati acquisiti in un arco di tempo piuttosto ampio (dal 1960 ad oggi) e usando differenti sistemi e parametri di acquisizione. Le tracce sia dei profili geologici che sismici sono stati georeferenziati e organizzati nel software QGis (versione 2.18.16). In particolare, sono stati georiferiti 88 profili di sismica a riflessione e 35 dati di pozzo, che sono stati successivamente importati in ambiente 3-D attraverso il software Move® (Midland Valley, versione 2106.2) usato per la fase di interpretazione (Figura L2-3b).

Al fine di convertire in profondità l'interpretazione delle linee sismiche, sono stati utilizzati alcuni dati di pozzo, le velocità intervallari presenti in letteratura (Bally et al., 1986; Montone & Mariucci, 2015) e mappe delle isocrone (<http://www.videpi.com>).

Sono state interpretate le seguenti unità stratigrafiche (dall'alto verso il basso; Figura L2-4): Il top del Pleistocene inferiore (top Gelasiano); il top della successione di avanfossa pliocenica; la superficie di unconformity pre-pliocenica (che corrisponde al top della formazione Gessoso-solfifera) che è rappresentata da un riflettore piuttosto continuo e caratterizzato da un alto coefficiente di riflessione. Inoltre è stato riconosciuto e interpretato il top della parte basse della successione carbonatica Mesozoica che corrisponde, in prima approssimazione, alle Marne a Fucoidi. Infine sono stati interpretati il fronte esterno della catena a pieghe dell'Appennino che è rappresentata dall'involuppo del fronte più esterno delle strutture compressive (Figura L2-4).

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

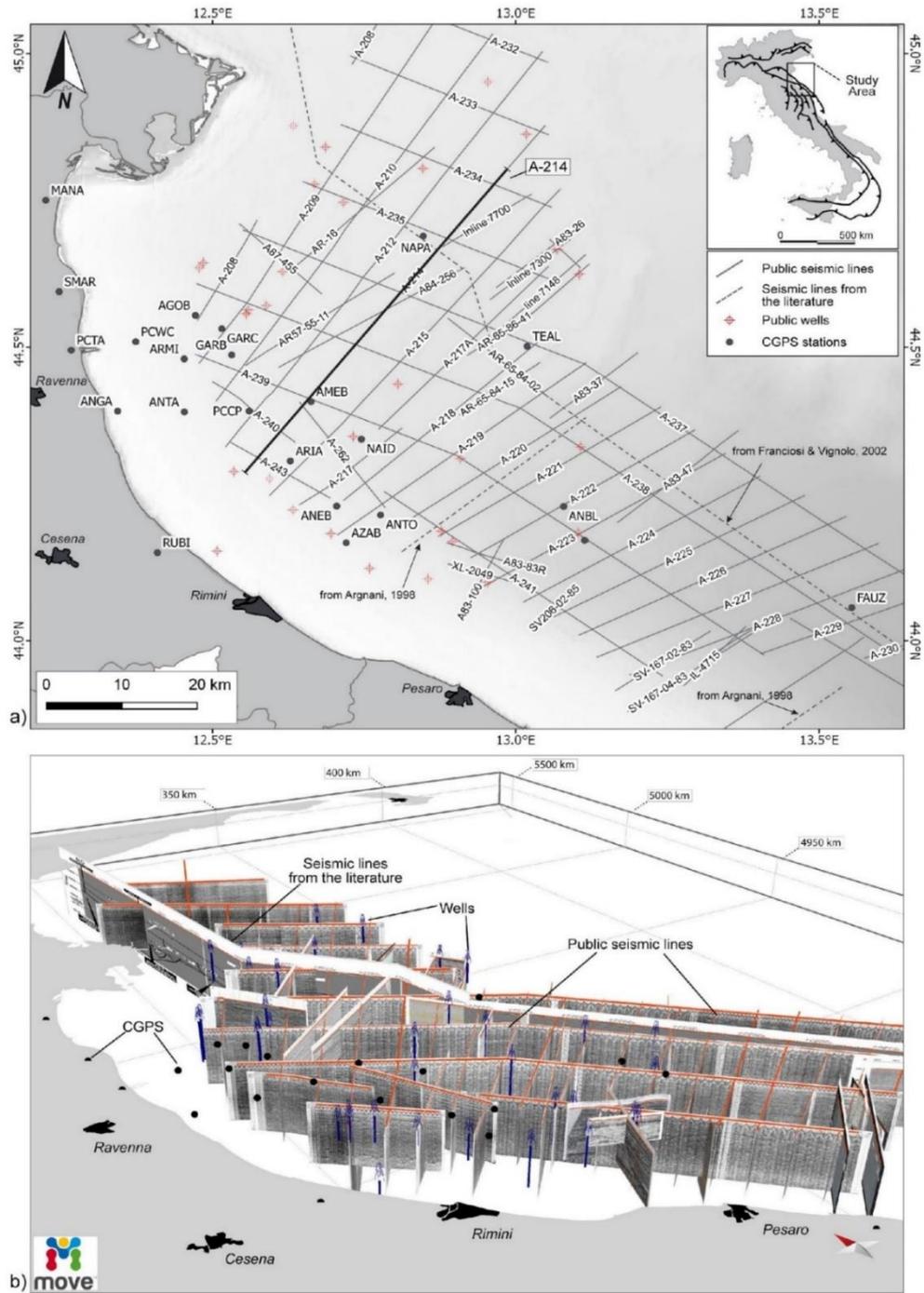


Figura L2-3 - Vista generale in mappa (a) e in 3-D (b) dei dati di sottosuolo utilizzati. Figura estratta da Pezzo et al. (2020).

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

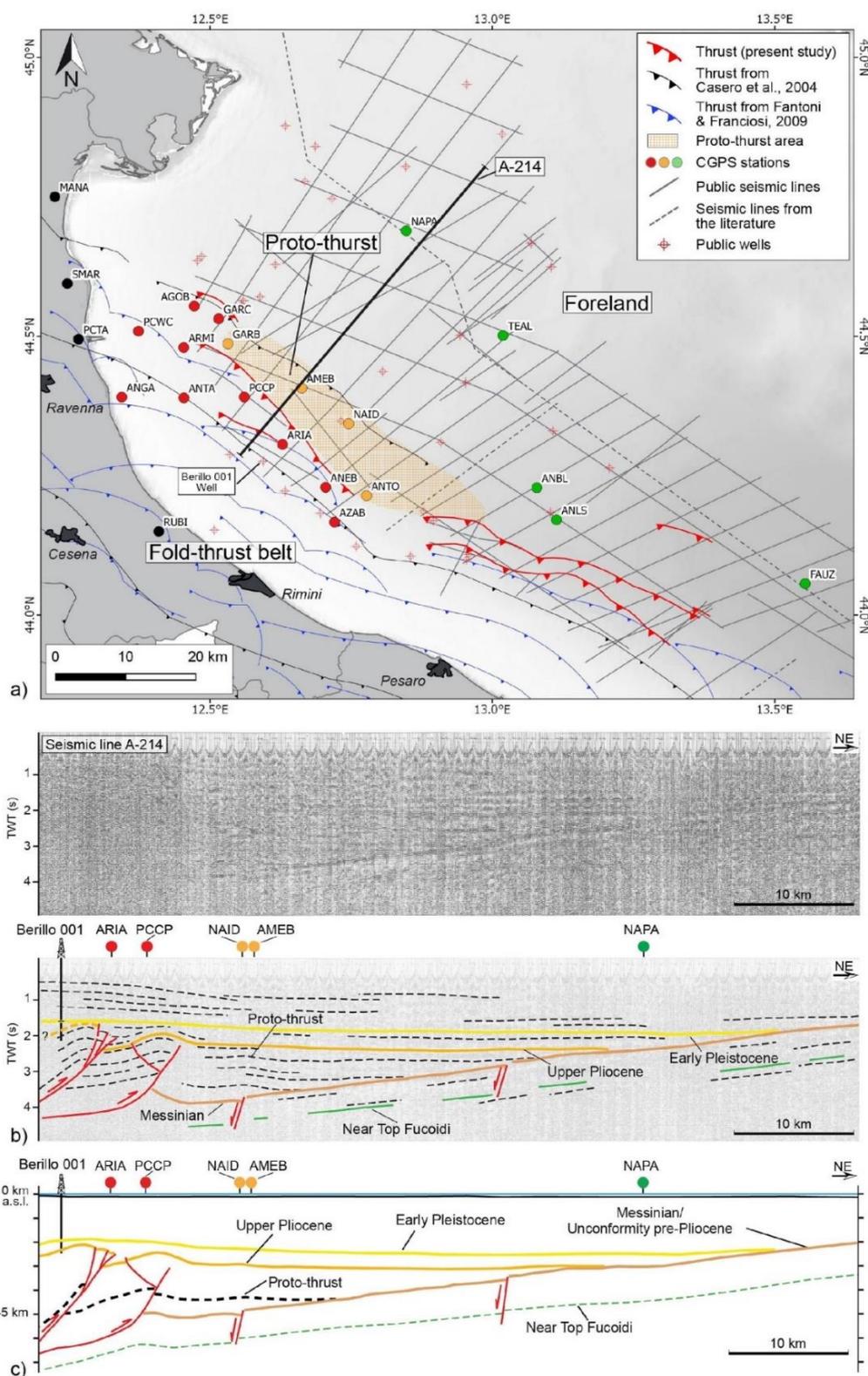


Figura L2-4 - (a) carta strutturale schematica dell'area di studio con le principali strutture tettoniche definite nel presente lavoro. (b) Profilo sismico A-214 da Videpi. I CGPS sono stati proiettati ortogonalmente sulla traccia del profilo e sono stati colorati a seconda dei domini tettonici in cui questi ricadono (rosso per la zona in compressione, arancio per l'area definita come proto-sovrascorrimento e verde per l'area di avampaese). (c) Sezione geologica dopo la conversione in profondità dell'interpretazione della linea sismica A-214. Figura estratta da Pezzo et al. (2020).

Dati CGPS e modellazione

Per l'area costiera periadriatica sono disponibili un gran numero di stazioni permanenti GPS, installata da diversi gestori, pubblici e privati. Pur non essendo lo standard qualitativo delle stazioni e l'estensione temporale dei dati sempre omogenei, ad oggi sono disponibili un gran numero di dati, soprattutto per l'area costiera adriatica nord occidentale. Alle soluzioni GPS disponibili per l'area e pubblicate in precedenti lavori (Devoti et al., 2017), per gli obiettivi di questa linea di ricerca sono stati integrati anche i dati provenienti da 31 stazioni CGPS di proprietà Eni S.p.A. installate lungo la costa e su piattaforme petrolifere operanti nel Mar Adriatico settentrionale (Figura L2-1). L'elaborazione e la validazione dei raw data GPS è stata oggetto di una specifica linea di ricerca (linea 4), i cui risultati sono stati utilizzati per la presente linea. Riassumendo, i dati raw consistono di osservazioni GPS campionate ogni 30 secondi utilizzando antenne geodetiche ad alta precisione montate su piattaforma petrolifera, per le stazioni offshore, o su pilastro in cemento, per quelle onshore. I dati utilizzati nella presente linea di ricerca sono stati elaborati con i software GAMIT e BERNES, le cui soluzioni sono ottenute con un approccio alle doppie differenze di fase. I parametri utilizzati sono consistenti con lo standard ITRF2008, il cui frame di riferimento è definito utilizzando almeno 40 stazioni EUREF ubicate nella placca euroasiatica. Le serie storiche CGPS di Eni coprono un intervallo di circa 19 anni, dal 1998 al 2017. I dettagli sul dataset e sul processamento sono stati pubblicati da Palano et al. (2020). Il campo di velocità CGPS è espresso rispetto ad Adria (Figure L2-5).

In un periodo di pochi anni, la cinematica della placca Adria può essere considerata come un processo stazionario. Perciò la velocità tettonica registrata dalla rete geodetica deve essere lineare nel tempo. Tuttavia le serie storiche CGPS mostrano importanti segnali non lineari imputabili ad altre cause che non siano quelle tettoniche, come, ad esempio la deformazione del suolo causata dall'estrazione di idrocarburi dal sottosuolo. Perciò le stazioni CGPS sono state classificate in base alle caratteristiche delle rispettive serie storiche attraverso un indice di non linearità (INL), che corrisponde al rapporto tra la deviazione standard delle serie storiche a cui è stato sottratto il segnale lineare e la deviazione standard del rumore intrinseco.

$$I_{NL} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |F_i - \bar{F}|}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |R_i - \bar{R}|}}$$

dove $i = 1 \dots N$ è il numero dei dati, F e R (con valore medio \bar{F} and \bar{R}) sono i dati della serie detrendizzata e residua. Valori di $INL \leq 0.5$ corrispondono a serie storiche lineari; all'aumentare di tali indici, diminuiscono le caratteristiche lineari e aumento quelle non lineari. Assumendo il segnale geodetico tettonico come lineare, è possibile assegnare delle classi di qualità (A, B, e C) alle serie per valori rispettivamente di $INL \leq 0.5$, $0.5 < INL \leq 1.0$, e $INL > 1.0$.

Uno degli obiettivi della linea di ricerca è quello di stimare il movimento intersismico delle maggiori strutture identificate nell'interpretazione delle linee sismiche. In particolare è stata simulata la deformazione superficiale associata al movimento uniforme dello scollamento regionale, utilizzando una semplice modellazione 2D, largamente utilizzata in diversi contesti tettonici in varie parti del mondo (e.g. Vergne et al., 2001; Fialko 2006; Pezzo et al., 2012; Ponraj et al., 2019; Anderlini et al., 2020). La scelta di un approccio si rende necessaria per evitare effetti laterali poco vincolati dai dati, andando così a simulare un piano di scorrimento infinitamente largo in direzione perpendicolare al profilo. Sono state proiettate le

velocità GPS lungo il profilo di Figura L2-6; in particolare è stata proiettata la componente parallela al profilo stesso e ortogonale alle strutture compressive dell'area. Lo spostamento superficiale è simulato utilizzando la formulazione di Okada, che assume un semispazio isotropo, omogeneo ed elastico, attraverso il software COULOMB (Toda et al., 2011). La geometria del piano di scollamento è basata sull'interpretazione del profilo sismico di Figura L2-4, integrato con quello di Fantoni & Franciosi (2009). Le simulazioni sono state effettuate per valori di slip-rate da 0.1 a 3.5 mm/anno per la porzione profonda del sovrascorrimento, bloccato nella sua porzione più superficiale (Figure L2-6). I modelli in grado di riprodurre le deformazioni osservate variano da 1.5 a 2.5 mm/anno.

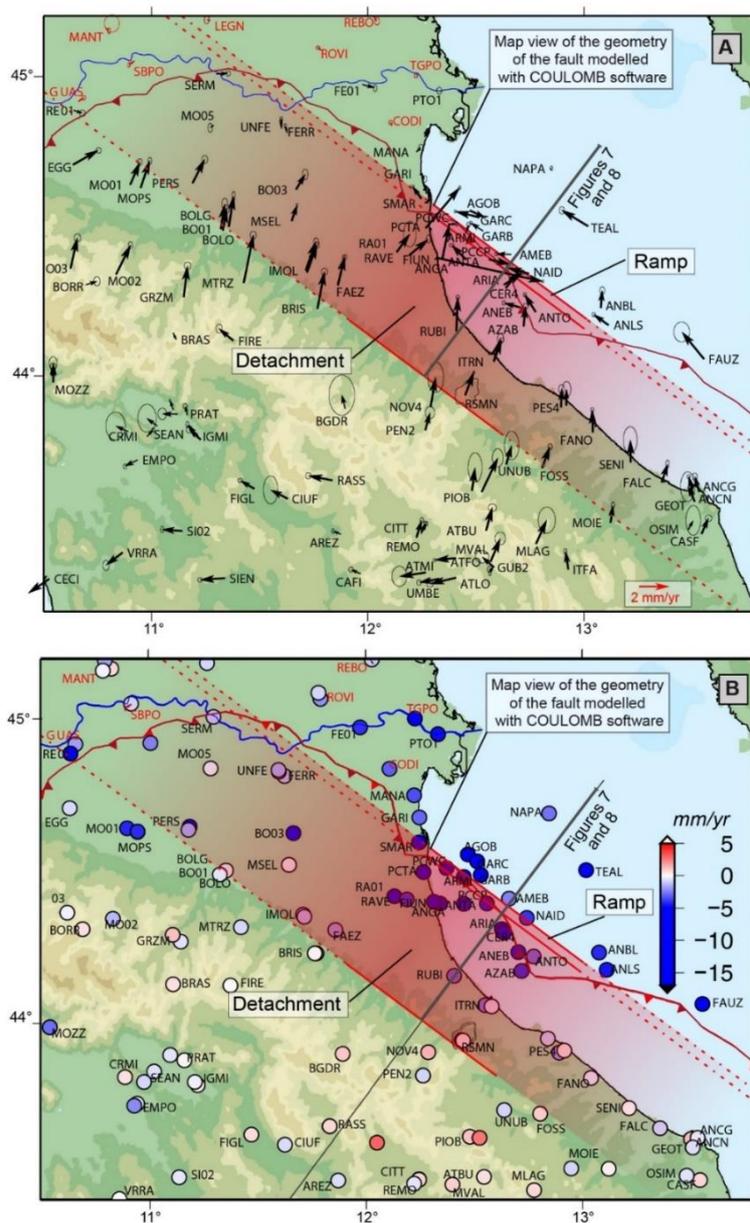


Figura L2-5 - (a) Mappa della velocità di spostamento del suolo nella componente orizzontale rispetto ad Adria. I parametri del polo Euretiano sono stati stimati utilizzando 21 stazioni CGPS ubicate nella pianura padana (indicate in rosso). La deformazione del suolo superficiale associata al movimento del detachment regionale è simulata utilizzando il software COULOMB (Toda et al., 2011). Le linee rosse e il poligono associato identificano la geometria della faglia simulata. In b), le velocità CGPS verticali. Figura estratta da Pezzo et al. (2020).

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

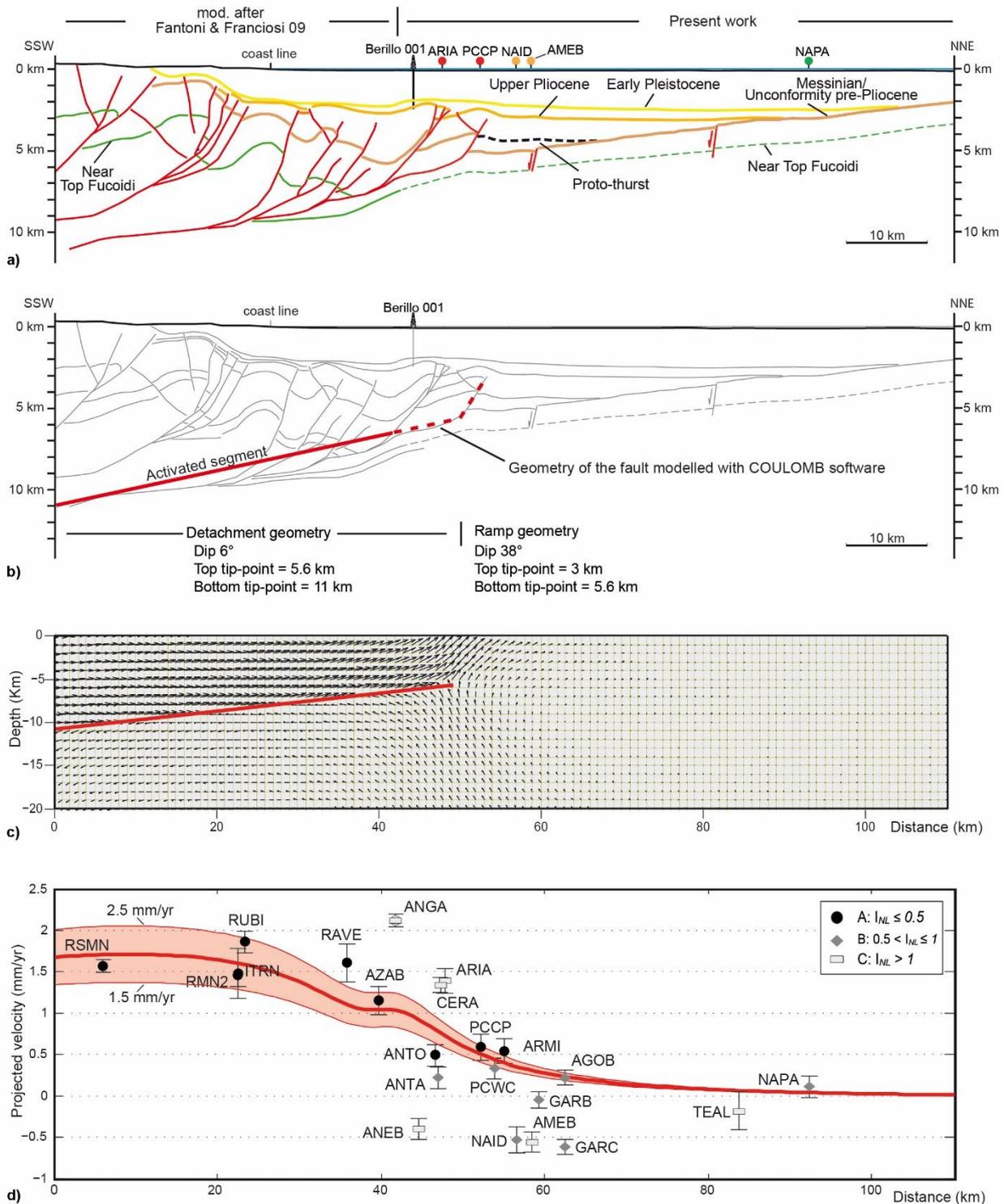


Figura L2-6 - Velocità CGPS e risultati della modellazione lungo il profilo geologico. a) Sezione geologica lungo la traccia del profilo mostrato in Figura L2-5, ottenuta dall'unione della sezione di Figura L2-4 con la sezione di Fantoni & Franciosi (2009). La sezione ha una esagerazione verticale uguale a 2. b) Risultati della modellazione con il software COULOMB. La linea rossa rappresenta la porzione di scollamento attiva nell'intersismico. La sezione ha una esagerazione verticale uguale a 2. c) Vettori delle velocità intersismiche modellate lungo la sezione geologica. Non è applicata nessuna esagerazione verticale. d) Velocità CGPS osservate (pallini da neri a grigi) e modellate (linea rossa) proiettate lungo il profilo geologico. Le stazioni CGPS sono classificate secondo l'indicatore di non linearità, per poter quantificare la loro deviazione dal segnale tettonico. Valori di $I_{NL} \leq 0.5$ rappresentano serie storiche con un puro segnale lineare. La banda rossa rappresenta le velocità orizzontali stimate dal modello prendendo in considerazione valori di slip rate variabili tra 1.5 e 2.5 mm/anno. Figura estratta da Pezzo et al. (2020).

I risultati della modellazione mettono in evidenza un pattern di velocità orizzontali positive (movimento verso NE) del settore onshore del profilo (tra 0 e 40 km). Dal 40° al 70° km lungo il profilo, le velocità rapidamente decrescono fino a 0. Oltre il 70° km le velocità restano sostanzialmente nulle, indicando una deformazione crostale trascurabile. La curva delle velocità modellate riproduce bene i dati CGPS di classe A ($INL \leq 0.5$); al crescere dell'indice di non linearità abbiamo un crescente scostamento tra dati e modello. Ciò sta ad indicare che il modello tettonico riproduce bene le velocità lineari e mette in luce come l'INL sia un buon indicatore dell'affidabilità del dato per studi tettonici. A causa della grande rumorosità dei dati CGPS, il parametro dello slip rate intersismico ottenuto dalla modellazione analitica non è ben vincolato e possiamo considerare affidabile un range di valori da 1.5 a 2.5 mm/anno. All'interno di questo intervallo i dati non permettono di favorire per un singolo modello e il valore ottenuto per il modello caratterizzato da residui più bassi può essere considerato solamente come un valore indicativo. Per quel che concerne la componente verticale, le velocità previste dal modello sono estremamente più basse rispetto a quelle osservate. Ciò è spiegabile con il fatto che tutte le stazioni sono affette da importanti segnali di abbassamento dovuti a fenomeni non tettonici come la subsidenza indotta dall'estrazione di idrocarburi, compattazione dei sedimenti sotto la piattaforma, etc.

L'integrazione dell'interpretazione dei profili sismici a riflessione con i dati CGPS ha permesso di definire una zona cinematicamente attiva fino ad ora non riconosciuta tra la porzione più esterna della catena appenninica e l'avampese in subduzione. In particolare i dati CGPS e i profili sismici a riflessione, con l'ausilio anche di una modellazione in 2-D, hanno permesso di definire una fascia orientata NW-SE e larga circa 30 km dove il gradiente della velocità dei CGPS mostra un accorciamento di circa 1.5 mm/anno. Verso Est questa zona di transizione riguarda in particolare una zona caratterizzata da sovrascorrimenti che tendono a muoversi verso Est ad una velocità di 1.5 mm/anno. Procedendo ancora verso Est, è stata evidenziata una zona a proto-thrust (un sovrascorrimento incipiente) che si muove a circa 0.5 mm/anno fino ad arrivare a 0 mm/anno nell'avampese indisturbato. I dati CGPS sono ben riprodotti dal modello analitico in 2-D.

La metodologia d'indagine qui presentata contribuisce a definire l'assetto di questa area di studio e fornisce un contributo importante per meglio comprendere l'attività tettonica dei sovrascorrimenti più esterni della catena appenninica. Infatti, tale attività sembra essere accomodata da slip asismico lungo lo scollamento basale che probabilmente può causare un accumulo di energia elastica lungo la porzione più esterna e superiore della rampa frontale. Di conseguenza, questo lavoro mostra come la porzione più esterna della catena appenninica in questa zona di studio sia ancora tettonicamente attiva. Questo lavoro mostra come i dati geodetici, seppur affetti da un disturbo antropico, integrati da interpretazione di profili sismici a riflessione e dati geologici possono contribuire a definire l'attività tettonica attuale anche in aree marine dove altre metodologie d'indagine non sono applicabili.

Sebbene in questa zona non siano state identificate sorgenti sismogenetiche negli attuali cataloghi, i risultati di questo studio suggeriscono la presenza di strutture tettoniche potenzialmente attive dal punto di vista sismico ed evidenziano la necessità di ulteriori studi, dati e approfondimenti volti a identificare e caratterizzare le potenziali sorgenti sismogenetiche dell'area.

Linea di ricerca 3 – Analisi delle deformazioni superficiali onshore e offshore attraverso dati satellitari ERS-1/2, ENVISAT e Sentinel-1 e tecniche di Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (CNR IREA)

L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) (Gabriel et al., 1989; Burgmann et al., 2000; Massonnet e Feigl, 1998) è una tecnica di telerilevamento che permette di misurare le deformazioni della superficie terrestre a partire dalla differenza di fase (interferogramma) tra due immagini SAR relative alla scena osservata e acquisite in tempi diversi lungo due orbite sufficientemente vicine. In particolare, tale tecnica consente di rilevare fenomeni di deformazione che producono una variazione di distanza dei target osservati dal sensore, misurando la proiezione dello spostamento lungo la linea di vista del radar (line of sight, LOS) con una precisione che è frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sistema, quindi dell'ordine del centimetro e, in alcuni casi, anche di qualche millimetro.

La capacità della tecnica DInSAR di rilevare gli effetti prodotti da singoli eventi deformativi (ad esempio un'eruzione vulcanica o un terremoto) è stata ampiamente dimostrata a partire dagli anni '90 e, successivamente, l'interesse della comunità scientifica e degli enti di sorveglianza si è concentrata sulla possibilità di monitorare l'evoluzione temporale delle deformazioni individuate, specie in zone con dinamica a carattere fortemente non lineare, come ad esempio, le aree soggette ad attività di estrazione/stoccaggio di idrocarburi e di re-iniezione di fluidi nel sottosuolo. In questo contesto, negli ultimi venti anni sono state sviluppate numerose tecniche interferometriche cosiddette "avanzate" (per distinguerle dalle tecniche DInSAR "classiche" che prevedono la produzione di singoli interferogrammi), basate su approcci multi-temporali. Tali tecniche, sfruttando efficacemente grandi data-set costituiti da decine o centinaia di immagini SAR, e scegliendo opportunamente le coppie di immagini SAR per la generazione dei corrispondenti interferogrammi, consentono di produrre non solo mappe di singoli eventi, ma anche serie temporali di deformazione relative a fenomeni lenti, caratterizzati da velocità di spostamento di alcuni cm/anno.

Tra le tecniche DInSAR avanzate un algoritmo ampiamente utilizzato è quello denominato Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002), sviluppato nel 2001 presso il CNR IREA di Napoli, che consente di analizzare le caratteristiche spazio-temporali dei fenomeni deformativi osservati mediante la generazione di mappe e serie temporali della deformazione superficiale, con un'accuratezza di circa alcuni mm/anno e sub-centimetrica/centimetrica per quanto riguarda, rispettivamente, le misure di velocità media di deformazione e le singole misure di spostamento (Casu et al., 2006; Lanari et al., 2007; Manunta et al., 2019). Tale tecnica si basa su una opportuna combinazione di interferogrammi, ottenuti a partire da dati acquisiti da orbite sufficientemente vicine (piccole baseline spaziali) e possibilmente con tempi di rivisitazione non elevati (piccole baseline temporali); queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore (denominati di decorrelazione spaziale e temporale) (Zebker et al., 1992), incrementando pertanto il numero di punti per unità di area sui quali si riesce a fornire una misura affidabile della deformazione osservata. Inoltre, tutte le misure di spostamento superficiale sono riferite ad un unico punto nello spazio, scelto in una zona ritenuta stabile, e ad un istante nel tempo, che tipicamente corrisponde alla prima acquisizione disponibile, e si riferiscono alla componente degli spostamenti superficiali rilevati, proiettata lungo il LOS del radar.

Un aspetto cruciale dell'approccio SBAS è costituito dalla possibilità di generare serie storiche di deformazione molto lunghe, di circa vent'anni, utilizzando congiuntamente dati SAR relativi alla stessa scena a terra e acquisiti da sensori diversi ma geometricamente compatibili, come nel caso dei sensori ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) (Pepe et al., 2005; Bonano et al., 2012). Pertanto, l'approccio SBAS multi-sensore consente di studiare fenomeni deformativi lenti su lunghi intervalli temporali e ricostruirne la loro evoluzione nel passato (back-analysis), sfruttando al meglio i grandi archivi di dati SAR collezionati dai due sistemi radar dal 1992 al 2010.

Recentemente, è stata sviluppata una versione parallela di tale tecnica, nota con l'acronimo di P-SBAS (Parallel SBAS) (Casu et al., 2014). P-SBAS sfrutta infrastrutture di calcolo distribuite (cluster, grid, cloud) utilizzando tecniche di programmazione multi-core e multi-nodo; è, quindi, in grado di eseguire l'elaborazione di grandi moli di dati SAR abbattendo notevolmente i tempi di calcolo rispetto alla versione originale sequenziale dell'approccio SBAS. La tecnica P-SBAS, quindi, consente la creazione di servizi

satellitari avanzati per il monitoraggio del territorio e la gestione del rischio ambientale, basati sull'aggiornamento automatico delle serie storiche di deformazione quando nuove acquisizioni sono disponibili. Questo tipo di applicazione è particolarmente rilevante se utilizzata in combinazione con dati SAR della costellazione Sentinel-1 del Programma Copernicus, che acquisisce immagini SAR con copertura globale a cadenza settimanale. Una sperimentazione della tecnica P-SBAS per la mappatura delle deformazioni del suolo a scala nazionale (Manunta et al., 2019) e scala continentale (Lanari et al., 2020) mediante l'utilizzo di dati Sentinel-1 con costi e tempi di calcolo contenuti è stata ultimamente effettuata con successo.

Per l'analisi delle deformazioni superficiali onshore e offshore, nel presente studio, sono stati utilizzati due set di dati SAR in banda C acquisiti lungo orbite discendenti dai sensori ERS-1/2 ed ENVISAT nell'intervallo temporale maggio 1995-luglio 2010 e dalla costellazione Sentinel-1 nell'intervallo marzo 2015-dicembre 2018, ai quali è stata applicata la tecnica SBAS (Berardino et al., 2002), (Casu et al., 2014).

Per quanto riguarda il primo data-set, sono stati considerati 138 dati satellitari (89 ERS-1/2, 49 ENVISAT) acquisiti lungo orbite discendenti; con tali dati sono stati generati 400 interferogrammi differenziali (ai quali è stato applicato l'algoritmo per il filtraggio del rumore di decorrelazione relativo a interferogrammi differenziali mediante l'utilizzo di reti interferometriche temporalmente ridondanti (Pepe et al., 2015), caratterizzati da valori di baseline spaziale inferiori a 400 m. Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato un DEM (Modello Digitale di Elevazione) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) dell'area con una risoluzione spaziale di 30 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie storiche di spostamento. Sia gli interferogrammi differenziali sia le successive mappe e serie storiche di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 80 m x 80 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking (media spaziale complessa); l'estensione spaziale dell'area esaminata è circa 80 km x 100 km.

Relativamente al secondo data-set, sono stati utilizzati 171 dati Sentinel-1; a partire dai quali sono stati generati 471 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline spaziale e temporale inferiori a 400 m e 150 giorni, rispettivamente, ai quali è stato anche applicato un algoritmo per il filtraggio del rumore di decorrelazione (Pepe et al., 2015). Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato un DEM SRTM dell'area con una risoluzione spaziale di 30 m. Sia gli interferogrammi differenziali sia le successive mappe e serie storiche di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 80 m x 80 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking; l'estensione spaziale dell'area esaminata è circa 200 km x 300 km.

Le caratteristiche principali dei due data-set utilizzati sono riportate in Tabella L3-1.

Tabella L3-1 Caratteristiche principali dei data-set ERS-1/2 ed-ENVISAT e Sentinel-1 utilizzati per l'analisi SBAS-DInSAR		
Sensore	ERS-1/2 ed ENVISAT	Sentinel-1
Track	122	95
Lunghezza d'onda	~ 5.6 cm	
Risoluzione spaziale del dato interferometrico	~ 80 m x 80 m	
Angolo di vista a centro scena	~23°	~39°
Estensione spaziale	~ 80 km x 100 km	~ 200 km x 300 km
# immagini	138	171
Intervallo temporale	maggio 1995 – luglio 2010	marzo 2015 – dicembre 2018

In Figura L3-1 è mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS relativa al data-set ERS-1/2 ed ENVISAT, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area esaminata. Le zone dove la misura di deformazione è affetta da fenomeni di decorrelazione sono state escluse dalla mappa a falsi colori; il riferimento spaziale rispetto al quale sono state calcolate le misure di deformazione è localizzato nel centro della città di Ravenna ed è indicato con un quadratino nero. La mappa mostra l'assenza di segnali deformativi spazialmente estesi, pur evidenziando alcuni fenomeni molto localizzati (dell'ordine del cm/anno) che interessano principalmente le aree costiere e la zona compresa tra Ravenna ed Imola. In Figura L3-2 è riportato uno zoom della mappa di Figura L3-1 relativa all'area di studio del progetto. La mappa rivela la presenza di fenomeni di deformazione che interessano principalmente l'area costiera che va da Lido Adriano a Lido Dante e la zona a Sud-Ovest del centro abitato di Ravenna. In Figura L3-2 sono riportati anche i plot delle serie temporali di deformazione relative ad alcuni punti coerenti localizzati in aree di interesse dal punto di vista deformativo. In particolare, i punti P1, P2 e P3, identificati da cerchietti bianchi in Figura L3-2, si trovano nella zona costiera tra Lido Adriano e Lido Dante; i corrispondenti plot rivelano la presenza di un fenomeno di deformazione il cui tasso aumenta muovendosi da Nord (Lido Adriano) a Sud (Lido Dante), raggiungendo valori che superano -1 cm/anno. Nella stessa Figura sono mostrati anche i plot delle serie di deformazione di tre punti in corrispondenza di piattaforme offshore, denominati P4, P5 e P6 ed evidenziati da cerchietti bianchi in Figura L3-2. Tali plot mostrano la presenza di fenomeni di subsidenza con tassi di deformazione che raggiungono il valore di -1 cm/anno.

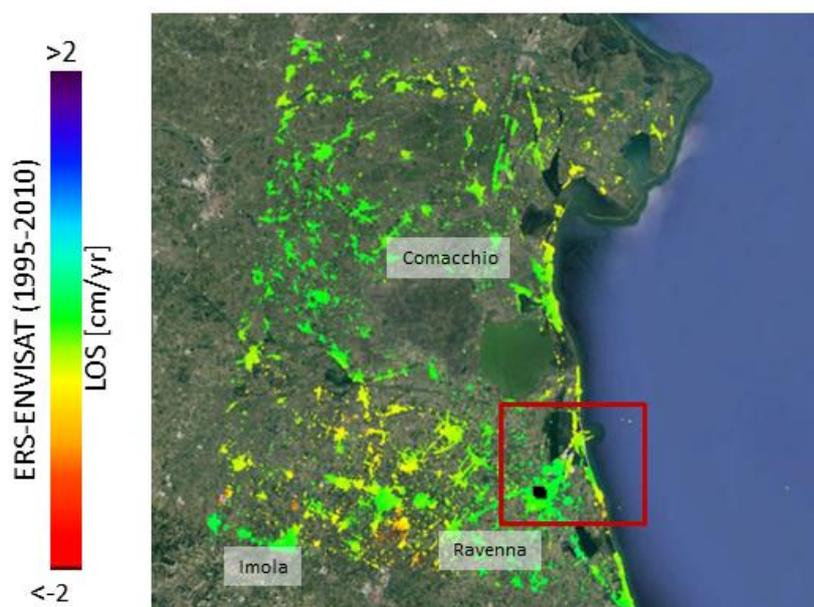


Figura L3-1 - Mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS, espressa in cm/anno e relativa all'elaborazione SBAS-DInSAR dei dati ERS-1/2 ed ENVISAT nell'intervallo temporale maggio 1995 – luglio 2010, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata. Il punto di riferimento spaziale rispetto al quale sono state calcolate le misure di deformazione è indicato con il quadratino nero. Il rettangolo rosso identifica l'area di studio mostrata nella Figura successiva.

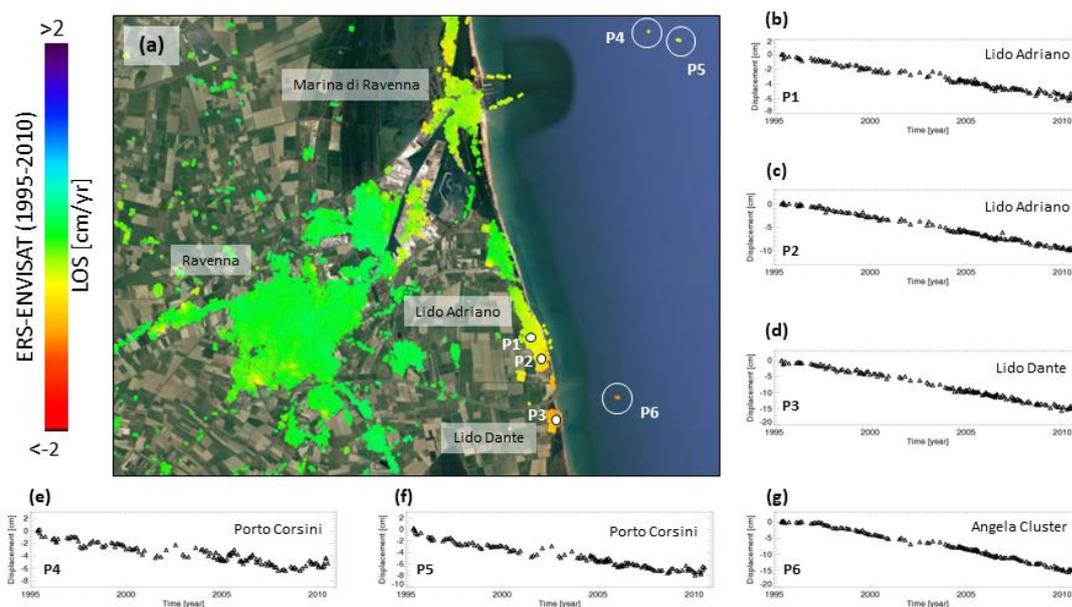


Figura L3-2 - (a) Zoom della mappa di velocità di deformazione di Figura 3.1. (b-g) Plot delle serie temporali di deformazione di sei punti coerenti, indicati con P1, P2 e P3, localizzati nella zona costiera onshore, e P4, P5 e P6 localizzati nell'area offshore.

In Figura L3-3 è riportata la mappa di velocità di deformazione in LOS relativa al data-set Sentinel-1 nell'intervallo temporale marzo 2015 – dicembre 2020, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area esaminata. Le zone dove la misura di deformazione è affetta da fenomeni di decorrelazione sono state escluse dalla mappa a falsi colori; il riferimento spaziale rispetto al quale sono state calcolate le misure di deformazione è localizzato nel centro della città di Ravenna ed è indicato con un quadratino nero in Figura L3-3. Anche in questo caso, sebbene l'area analizzata sia significativamente più estesa di quella considerata per il precedente data-set (ERS-1/2 ed ENVISAT), non sono emersi fenomeni deformativi a carattere regionale, ma sono stati misurati alcuni spostamenti (anche di svariati cm/anno) localizzati in corrispondenza dell'area di Bologna e del centro Italia, questi ultimi associati alla sequenza sismica avvenuta nel periodo agosto-ottobre 2016. In Figura L3-4 è mostrato uno zoom della mappa di Figura L3-3 relativa all'area di studio del progetto. La mappa rivela la presenza di alcuni fenomeni molto localizzati che interessano principalmente l'area costiera che va da Lido Adriano a Lido Dante e la zona portuale di Ravenna. La Figura riporta anche i plot delle serie storiche di deformazione relative ad alcuni punti coerenti. In particolare, i punti P1, P2 e P3, identificati da cerchi bianchi in Figura 3.4, si trovano nella zona costiera tra Lido Adriano e Lido Dante; i corrispondenti plot rivelano la presenza di un fenomeno di deformazione che, come visto nel periodo precedente, è caratterizzato da un tasso che aumenta muovendosi da Nord (Lido Adriano) a Sud (Lido Dante), raggiungendo valori di circa -1 cm/anno. Nella stessa Figura sono mostrati anche i plot delle serie di deformazione di due punti in corrispondenza di piattaforme offshore, denominati P4 e P5 ed evidenziati da cerchi bianchi in Figura L3-4. Tali plot mostrano la presenza di fenomeni di subsidenza con tassi di deformazione che superano il valore di -1 cm/anno.

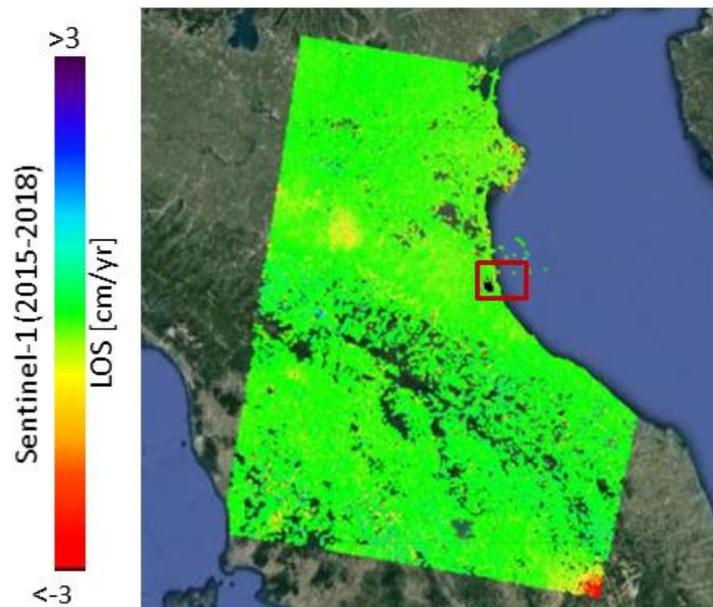


Figura L3-3 - Mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS, espressa in cm/anno e relativa all'elaborazione SBAS-DInSAR dei dati Sentinel-1 nell'intervallo temporale marzo 2015 – dicembre 2018, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata. Il punto di riferimento spaziale rispetto al quale sono state calcolate le misure di deformazione è indicato con il quadratino nero. Il rettangolo rosso identifica l'area mostrata nella Figura successiva.

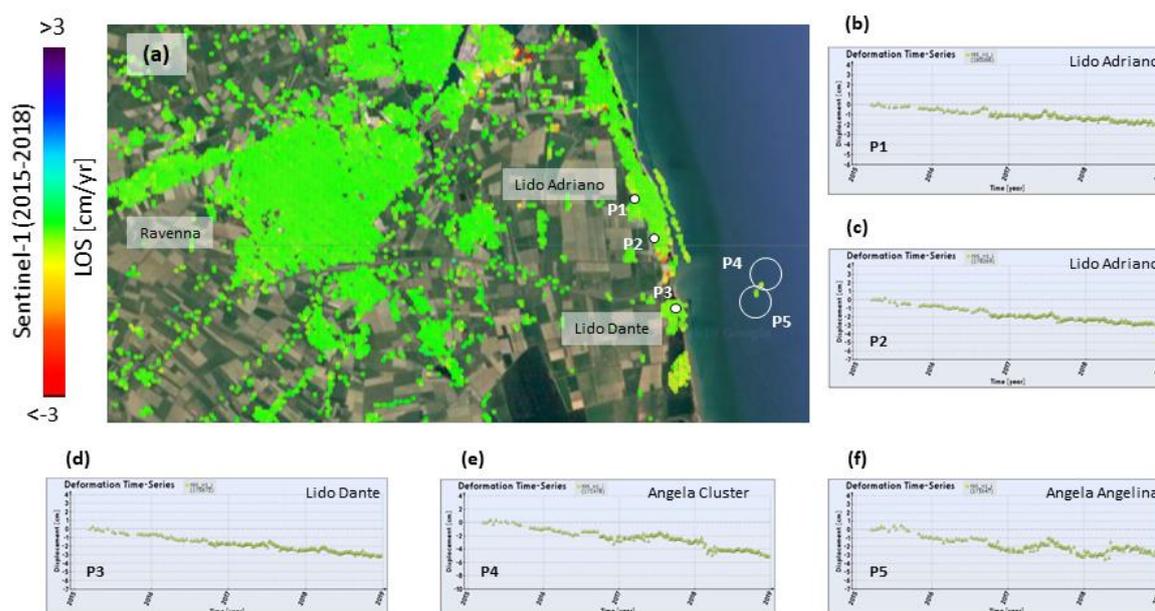


Figura L3-4 - (a) Zoom della mappa di velocità di deformazione di Figura L3-3. (b-f) Plot delle serie temporali di deformazione di cinque punti coerenti, indicati con P1, P2 e P3, localizzati nella zona costiera onshore, e P4 e P5, localizzati nell'area offshore.

Linea di ricerca 4 – Studio dei metodi geodetici di misura e calcolo avanzato per il monitoraggio onshore e possibile estensione ad aree marino costiere (INGV e Università di Bologna)

Nell’ambito di questa linea di ricerca, al fine di verificare e validare metodi e tecniche di misura delle deformazioni del suolo per il monitoraggio onshore ed offshore, è stato elaborato un set di dati (in formato RINEX) acquisito da 37 stazioni GPS (Figura L4-1 e Tabella L4-1) installate rispettivamente su 13 infrastrutture onshore (centri di raccolta e trattamento; posizionate lungo la fascia costiera adriatica) e 24 infrastrutture offshore (piattaforme; posizionate nell’offshore adriatico). Le stazioni GPS mostrano una buona continuità del dato acquisito; 34 stazioni ricoprono un periodo temporale superiore agli 8 anni, mentre 3 stazioni ricoprono un arco temporale inferiore ai 5 anni.

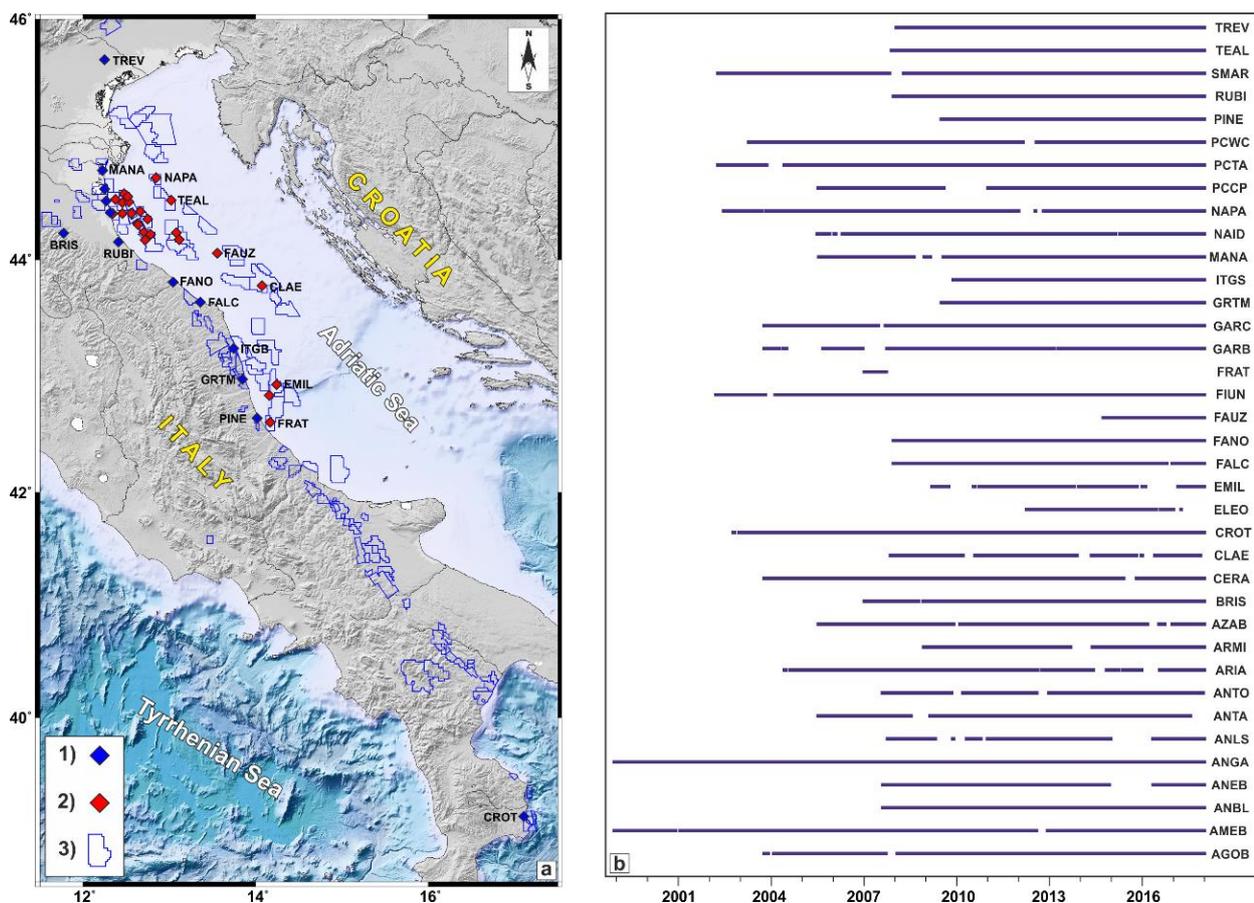


Figura L4-1 - (a) Mappa delle stazioni GPS fornite da ENI S.p.A. (b) Grafico temporale della disponibilità del dato RINEX per ciascuna stazione GPS. Ulteriori dettagli sono descritti in Tabella 1. Figura estratta da Palano et al., 2020.

Stazione	Denominazione	Note	Long. (°)	Lat. (°)	Quota (metri)	Inizio	Fine	Durata (anni)	Concessione
AGOB	AGOSTINO-B	P	12.472	44.554	67.13	2003.78	2018.00	14.22	A.C 3.AS
AMEB	AMELIA-B	P	12.662	44.407	73.26	1998.92	2018.00	19.08	A.C 2.AS
ANBL	ANNABELLA	P	13.079	44.229	76.63	2007.60	2018.00	10.40	A.C 18.AG
ANEB	ANEMONE-B	P	12.705	44.229	63.54	2007.60	2018.00	10.40	A.C 5.AV
ANGA	ANGELA-ANGELINA	P	12.344	44.391	73.34	1998.92	2018.00	19.08	A.C 27.EA
ANLS	ANNALISA	P	13.114	44.171	63.08	2007.76	2018.00	10.24	A.C 32.AG
ANTA	ANTARES	P	12.454	44.390	73.11	2005.52	2017.55	12.03	A.C 30.EA
ANTO	ANTONELLA	P	12.777	44.214	68.06	2007.60	2017.96	10.37	A.C 5.AV
ARIA	ARIANNA-A	P	12.628	44.306	68.84	2004.42	2018.00	13.58	Cervia Mare
ARMID	ARMIDA	P	12.453	44.480	73.03	2008.92	2018.00	9.07	A.C 29.EA
AZAB	AZALEA-B	P	12.720	44.167	78.15	2005.53	2018.00	12.47	A.C 8.ME
BRIS	BRISIGHELLA	C.R.T.	11.774	44.225	220.68	2007.00	2018.00	11.00	---
CERA	CERVIA-A	P	12.639	44.294	67.14	2003.78	2018.00	14.22	Cervia Mare

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

CLAE	CLARA-EST	P	14.072	43.780	65.87	2007.85	2017.87	10.02	B.C 13.AS
CROT	CROTONE	C.R.T.	17.106	39.105	45.78	2002.77	2018.00	15.23	---
ELEO	ELEONORA	P	14.156	42.840	72.53	2012.26	2017.25	4.99	B.C 3.AS
EMIL	EMILIO	P	14.243	42.935	66.18	2009.19	2018.00	8.81	B.C 3.AS
FALC	FALCONARA	C.R.T.	13.358	43.640	46.38	2007.95	2018.00	10.05	---
FANO	FANO	C.R.T.	13.041	43.809	51.39	2007.94	2018.00	10.06	---
FAUZ	FAUZIA	P	13.554	44.056	67.00	2014.74	2018.00	3.26	A.C 36.AG
FIUN	FIUMI UNITI	C.R.T.	12.316	44.397	43.59	2002.20	2018.00	15.80	
FRAT	FRATELLO CLUSTER	P	14.168	42.612	63.69	2007.00	2007.72	0.71	B.C 5.AS
GARB	GARIBALDI-B	P	12.532	44.487	66.39	2003.77	2018.00	14.23	A.C 1.AG
GARC	GARIBALDI-C	P	12.515	44.531	72.60	2003.77	2018.00	14.23	A.C 1.AG
GRTM	GROTTAMMARE	C.R.T.	13.845	42.980	70.57	2009.50	2018.00	8.50	S. Benedetto del Tronto
ITGS	ITALGAS	C.R.T.	13.744	43.245	105.91	2009.92	2018.00	8.08	---
MANA	MANARA	C.R.T.	12.226	44.750	44.19	2005.53	2018.00	12.47	Manara
NAID	NAIDE	P	12.745	44.343	62.33	2005.49	2018.00	12.51	A.C 21.AG
NAPA	NAOMI-PANDORA	P	12.847	44.689	68.83	2002.46	2018.00	15.53	A.C 33.AG
PCCP	PORTO CORSINI M E C	P	12.561	44.391	71.99	2005.52	2018.00	12.48	Porto Corsini Mare
PCTA	SPINARONI	C.R.T.	12.267	44.495	45.16	2002.28	2018.00	15.72	Porto Corsini Terra
PCWC	PORTO CORSINI M W C	P	12.373	44.509	72.42	2003.27	2018.00	14.73	A.C 26.EA
PINE	PINETO	C.R.T.	14.014	42.644	55.97	2009.50	2018.00	8.50	---
RUBI	RUBICONE	C.R.T.	12.409	44.150	47.30	2007.95	2018.00	10.05	---
SMAR	SMARLACCA	C.R.T.	12.247	44.594	44.43	2002.28	2018.00	15.72	Dosso degli angeli
TEAL	TEA-LAVANDA-ARNICA	P	13.019	44.501	66.16	2007.88	2018.00	10.12	A.C 34.AG
TREV	TREVISO	C.R.T.	12.246	45.668	69.71	2008.04	2018.00	9.96	---

Tabella L4-1 – Elenco delle stazioni GPS fornite da ENI S.p.A. nell'ambito delle attività previste dall'Accordo operativo 2018-19 per collaborazione scientifica tra INGV e MISE-DGS-UNMIG. Per ciascuna stazione vengono indicate: denominazione, tipologia (P: Piattaforma, C.R.T.: Centro di Raccolta e Trattamento), coordinate (Longitudine, Latitudine, Quota WGS84), inizio, fine e durata del set di dati, concessione di coltivazione di riferimento.

In fase di pre-elaborazione, i dati RINEX dell'intero dataset sono stati analizzati mediante l'utilizzo dei software TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>) e G-Nut/Anubis (<https://www.pecny.cz/GOP/index.php/gnss/sw/anubis>) al fine di valutare la qualità del dato acquisito e la presenza di eventuali ostruzioni al segnale GPS.

Per quanto concerne la qualità del dato acquisito, gli indici principalmente utilizzati sono i valori di root mean square (RMS) sui valori di multipath sulle fasi L1 (MP1) e L2 (MP2), ossia su quella porzione del segnale radio che arriva all'antenna dopo essere stata riflessa da oggetti circostanti, subendo pertanto una alterazione della misura della distanza satellite-ricevitore. Inoltre, per ogni file RINEX sono state estratte le informazioni relative anche al numero di epoche acquisite (pari a 2880 su una acquisizione giornaliera di 24 ore con sampling-rate di 30 secondi), al numero totale delle osservazioni (numero di epoche acquisito da ciascun satellite), e al numero di cycle-slips (salti di ciclo che occorrono quando il ricevitore perde il tracking dei satelliti in vista).

In Figura L4-2 viene riportato un esempio di tali parametri per la stazione ANLS. Dall'analisi dei valori di RMS sul dato di multipath sulle fasi L1 (MP1) e L2 (MP2) risulta che i dati acquisiti alle 37 stazioni sono di qualità compresa tra sufficiente (5 stazioni sono caratterizzate da valori compresi tra 0,4 e 0,75 m) e buona (le rimanenti 32 stazioni sono caratterizzate da valori generalmente inferiori a 0,4 m).

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

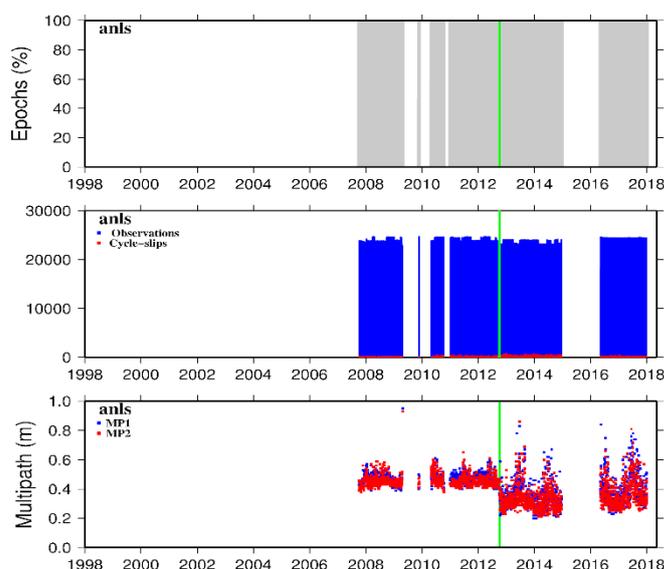


Figura L4-2 – Grafici temporali (su base giornaliera) di alcuni parametri ottenuti dall’analisi dei dati RINEX acquisiti alla stazione ANLS (vedasi Tabella 1 per dettagli) mediante l’ausilio del software TEQC. In alto: grafico temporale della percentuale di epoche acquisite. Al centro: grafico temporale del numero totale delle osservazioni acquisite (in blu) e dei cycle-slips (in rosso). In basso: andamento dei valori di MP1 (in blu) e MP2 (in rosso). La linea verticale (in verde) indica un cambio strumentale (antenna e/o ricevitore).

Per quanto concerne la presenza di eventuali ostruzioni al segnale GPS, per ciascuna stazione sono stati realizzati gli skyplots delle traiettorie dei satelliti (vedasi esempio in Figura L4-3). Dall’analisi degli skyplots si osserva la presenza di ostacoli al segnale GPS solo per le stazioni installate onshore in prossimità dei centri di raccolta e trattamento.

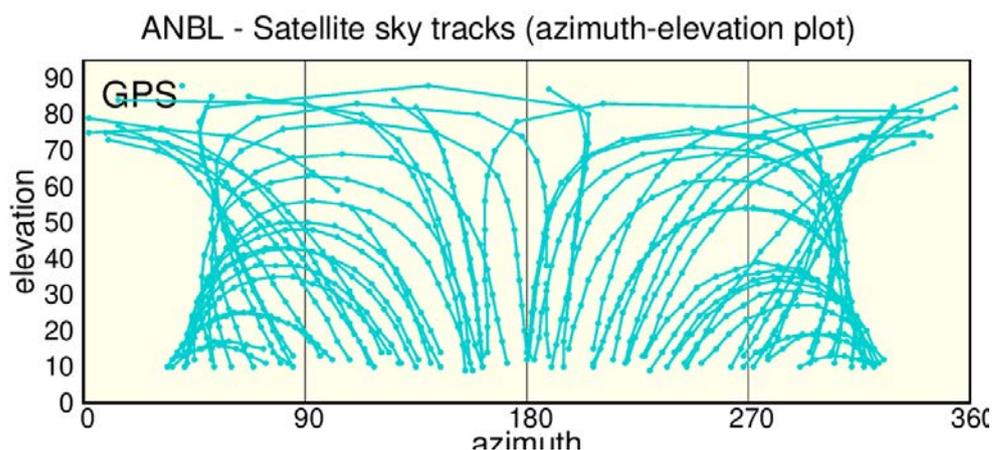


Figura L4-3 – Esempio di skyplots delle traiettorie dei satelliti acquisiti alla stazione ANBL dalla costellazione GPS nella giornata del 01.01.2017. Il grafico è stato realizzato mediante l’utilizzo del software G-Nut/Anubis. I dati sono caratterizzati da un angolo di cut-off pari a 10°.

Per poter confrontare e validare le diverse metodologie di analisi e le diverse catene di processamento dati, l’elaborazione del dataset è stata effettuata da diversi centri di analisi dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e dell’Università di Bologna, utilizzando software differenti. Allo scopo di produrre una soluzione finale accurata e, allo stesso tempo, ottenere strategie di analisi comparabili tra i diversi metodi, ogni centro di analisi ha elaborato i dati “raw” utilizzando software scientifici di alto livello, comunemente

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

utilizzati dalla comunità geodetica internazionale. In particolare le elaborazioni dei dati sono state così organizzate, per un totale di 6 differenti soluzioni:

- l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna (INGV-BO) ha elaborato una soluzione con GAMIT/GLOBK e QOCA (IBO_GAMIT);
- l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Osservatorio Etno (INGV-OE) ha elaborato una soluzione con GAMIT/GLOBK (IOE_GAMIT);
- l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Osservatorio Nazionale Terremoti (INGV-ONT) ha elaborato una soluzione con GIPSY (ONT_GIPSY) e una con Bernese (ONT_BERNESE);
- il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - Università di Bologna (DICAM-UniBO) ha elaborato una soluzione con GIPSY (UBO_GIPSY) e una con GAMIT/GLOBK (UBO_GAMIT).

La fase di elaborazione dei dati RINEX richiede l'acquisizione di dati ancillari (orbite precise dei satelliti, parametri di orientazione terrestre, maree terrestri, moto del polo, ecc.) e la scelta di parametri fisici utili a correggere effetti sistematici che perturbano i dati acquisiti (effetto ionosferico e troposferico, ecc.) che potenzialmente presentano un rilevante impatto sui risultati finali. In fase di elaborazione si è cercato di utilizzare una strategia di calcolo comune in grado di garantire che i dati ancillari ed i parametri fisici adottati non costituiscano fonte di diversificazione tra le soluzioni ottenute con i software utilizzati (vedasi Tabella 2).

Soluzione	UBO_GAMIT	UBO_GIPSY	IBO_GAMIT	IOE_GAMIT	ONT_GIPSY	ONT_BERNESE
Data processing parameters						
Software	Gamit (Ver. 10.61)	GipsyX (Ver. rc0.4)	Gamit (Ver. 10.70) + QOCA	Gamit/Globk (Ver. 10.70)	Gipsy (ver. 6.3)	Bernese (ver 5.0)
Processing sampling rate	30 sec	30 sec	30 sec	30 sec	30 sec	30 sec
Elevation mask	10°	10°	10°	10°	0°	10°
Antenna phase center models	IGS, final	JPL, final	IGS, final	IGS, final	JPL, final	repro2, IGS, final
Ocean tides loading model	VMF1	VMF1	VMF1	VMF1	VMF1	NIELL
Ionosphere correction	2nd order ionosphere correction	2nd order ionosphere correction	2nd order ionosphere correction	2nd order ionosphere correction	2nd order ionosphere correction	no 2nd order correction
Ambiguity resolution	Yes	Yes, with wlpb files	Yes	Yes	Yes, with wlpb files	Yes
Reference frame/system and strategy for alignment of solutions						
Alignment strategy	7 parameter transformation	7 parameter transformation	7 parameter transformation	7 parameter transformation	7 parameter transformation	4 parameter transformation
Reference frame/system	IGb08	IGb08	IGb08	IGb08	IGS14	IGb08
Sinex file	IGb08.sinx	IGb08.sinx	IGb08.sinx	IGb08.sinx		IGb08.sinx
Reference stations	BUCU, GRAS, GRAZ, MATE, MEDI, NOT1, SOFI, WTZR, ZIMM	BUCU, GRAS, GRAZ, MATE, MEDI, NOT1, SOFI, WTZR, ZIMM	IGb08 core sites	BRUS, BRUX, COMO, GENO, GRAS, GRAZ, JOZE, MATE, NOT1, PRAT, TORI, ZIMM, ZOUF	132 stations used for reference frame alignment	45 anchor stations in Europe

Tabella L4-2 – Parametri fisici e dati ancillari adottati in fase di elaborazione dei dati RINEX forniti da Eni S.p.A.

Dai dati in output di ciascun centro di analisi sono state estratte le serie temporali delle posizioni tridimensionali e le incertezze associate per tutte le stazioni analizzate. Tali posizioni sono state riferite ai sistemi di riferimento IGS08 (Rebischung, 2012) e IGS14 (Rebischung et al., 2016). Le serie temporali sono state confrontate tra loro al fine di evidenziare eventuali differenze derivanti dall'utilizzo dei diversi software e dai modelli specifici che sono stati selezionati e applicati nell'analisi. Tale confronto è mirato anche alla individuazione di i) eventuali offsets, spesso non noti a priori in quanto non documentati negli headers dei file RINEX, e di ii) eventuali outliers legati a problemi in fase di elaborazione. A tal fine, utilizzando il software TSAnalyzer (<https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/TSAnalyzer.htm>), sono state prese in considerazione le serie temporali ottenute come primo output dai centri di analisi, definite come "serie temporali raw" in quanto ancora caratterizzate dalla presenza di eventuali outliers e offsets.

Le serie temporali di posizionamento possono essere modellate come la sovrapposizione di tre tipi principali di segnali: (i) deformazione lineare a lungo termine, (ii) segnali stagionali, (iii) offsets strumentali (ad esempio, cambiamenti dell'antenna GNSS) e tettonici (spostamento co-sismico). Pertanto, il movimento del sito $y(t)$ per ogni componente può essere modellato come segue:

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{g_j}) + v_i \quad (1)$$

dove t_i per $i = 1 \dots N$ sono le epoche della soluzione giornaliera (in anni). I termini a e b indicano la posizione del sito ed il tasso lineare; i coefficienti c e d descrivono il moto periodico annuale mentre e ed f quello semi-annuale. Il termine di sommatoria corregge qualsiasi numero (n_g) di offset, con magnitudo g ed epoca T_g utilizzando la funzione a gradini di Heaviside, H , ed infine l'ultimo termine, v_i , è il residuo. Tutti i parametri stimati per ciascuna soluzione sono stati riportati in files logs ASCII e pubblicamente divulgati nel repository online (Palano et al., 2020).

Una prima ispezione visiva di tutte le serie temporali "raw" rivela che esse contengono sia offsets che outliers. Gli outliers che mostrano grandi incertezze sono stati rimossi adottando una soglia arbitraria sul software TSAlyzer. Gli offset sono stati identificati manualmente ed inseriti nel file 'ENI_Offsets.json' (disponibile nel repository online, vedasi Palano et al., 2020) per un uso successivo. Tutti gli offsets sono riportati anche in Tabella L4-3: i) gli offsets classificati come "tettonici" corrispondono alla deformazione co-sismica relativa ai terremoti di magnitudo $M > 6$ che colpirono il centro Italia il 24 agosto 2016 ed il 26 ottobre 2016, ii) gli offsets classificati come "strumentazione" corrispondono al cambiamento nelle antenne mentre iii) gli offsets classificati come "sconosciuti" sono caratterizzati da un movimento sospetto la cui natura potrebbe essere correlata alle operazioni di servizio sulla piattaforma.

Stazione	Data offset	Note
AMEB	26/10/2011	sconosciuto
	15/03/2012	sconosciuto
	20/03/2012	sconosciuto
	01/04/2012	sconosciuto
	07/04/2012	sconosciuto
	11/04/2012	sconosciuto
	12/05/2012	sconosciuto
	17/05/2012	sconosciuto
	04/12/2012	strumentale
ELEO	30/10/2016	tettonico
EMIL	29/07/2015	sconosciuto
	25/01/2016	sconosciuto
FALC	30/10/2016	tettonico
GARC	06/10/2011	sconosciuto
GRTM	22/06/2010	sconosciuto
	24/08/2016	tettonico
	30/10/2016	tettonico
	14/12/2017	sconosciuto
ITGS	24/08/2016	tettonico
	30/10/2016	tettonico
NAPA	01/01/2012	sconosciuto
PCWC	07/10/2009	sconosciuto
	14/07/2011	sconosciuto
PINE	24/08/2016	tettonico
	30/10/2016	tettonico
SMAR	31/08/2011	sconosciuto

Tabella L4-3 – Lista degli offsets identificati.

In un primo step, dopo aver corretto gli offsets (Tabella L4-3) e rimosso l'andamento lineare come definito nell'equazione (1), i residui di ciascuna serie temporali sono stati confrontati tra loro per ciascuna soluzione (Figura L4-4). Questo semplice confronto evidenzia come le principali caratteristiche delle serie temporali (es. segnali stagionali, intervalli di tempo più rumorosi, transienti a breve termine, ecc.) mostrano un buon accordo tra le diverse soluzioni.

Il software TSanalyzer permette di stimare anche i valori dello scarto quadratico medio ponderato (WRMS) per ciascuna serie temporale analizzata, dopo aver filtrato gli outliers e stimato i parametri in base all'equazione (1). Il valore di WRMS viene indicato tra i parametri comunemente adottati dalla comunità geodetica internazionale per stimare il grado di rumorosità di una serie temporale. Il valore di WRMS rappresenta lo scarto quadratico medio del fit lineare pesato delle serie temporali della stazione GPS in esame. Più basso è il valore di WRMS, minore è il grado di rumorosità della serie analizzata. Gli istogrammi di frequenza dei valori di WRMS per le componenti orizzontali e verticali di ciascuna soluzione sono riportati in Figura L4-5, mentre l'intervallo di valori, valori medi e valori mediani sono riportati nella Tabella L4-4.

Soluzione	North			East			Up		
	<i>intervallo valori</i>	<i>Valore medio</i>	<i>Valore mediano</i>	<i>intervallo valori</i>	<i>Valore medio</i>	<i>Valore mediano</i>	<i>intervallo valori</i>	<i>Valore medio</i>	<i>Valore mediano</i>
IBO_GAMIT	0.94 - 4.79	1.64	1.40	0.93 - 3.17	1.49	1.39	3.06 - 8.01	4.37	4.20
IOE_GAMIT	0.88 - 4.96	1.55	1.28	0.75 - 3.26	1.39	1.28	2.85 - 8.67	4.12	3.87
ONT_BERNESE	1.02 - 5.21	2.09	1.73	1.21 - 6.43	2.08	1.84	3.18 - 9.40	5.00	4.55
ONT_GIPSY	0.89 - 4.43	1.58	1.42	0.70 - 6.05	1.48	1.27	2.95 - 6.95	4.21	4.05
UBO_GAMIT	1.08 - 4.63	1.66	1.44	1.04 - 5.18	1.65	1.49	2.91 - 6.08	4.08	3.97
UBO_GIPSY	0.94 - 4.54	1.64	1.49	0.80 - 7.49	1.63	1.41	2.96 - 7.06	4.33	4.27

Tabella L4- 4 - Valori di WRMS (in mm) per le serie analizzate.

Tutte le soluzioni sono caratterizzate da valori molto simili, evidenziando patterns simili tra le differenti soluzioni, come ad esempio:

- i valori medi e mediani di WRMS per la componente verticale sono di circa tre volte più grandi di quelle orizzontali;
- i valori WRMS più alti sono osservati sempre nelle stesse stazioni (CERA e AMEB; vedere il relativo file di log nel repository per ulteriori dettagli, Palano et al., 2020).

Inoltre, i valori di WRMS calcolati ricadono nello stesso intervallo di valori di quelli stimati per le stazioni onshore con finestre temporali di osservazione comparabili. Nell'insieme, le differenti soluzioni presentano valori di WRMS consistenti con i valori riportati in letteratura specialistica (vedasi Serpelloni et al., 2013 per ulteriori dettagli).

AGOB

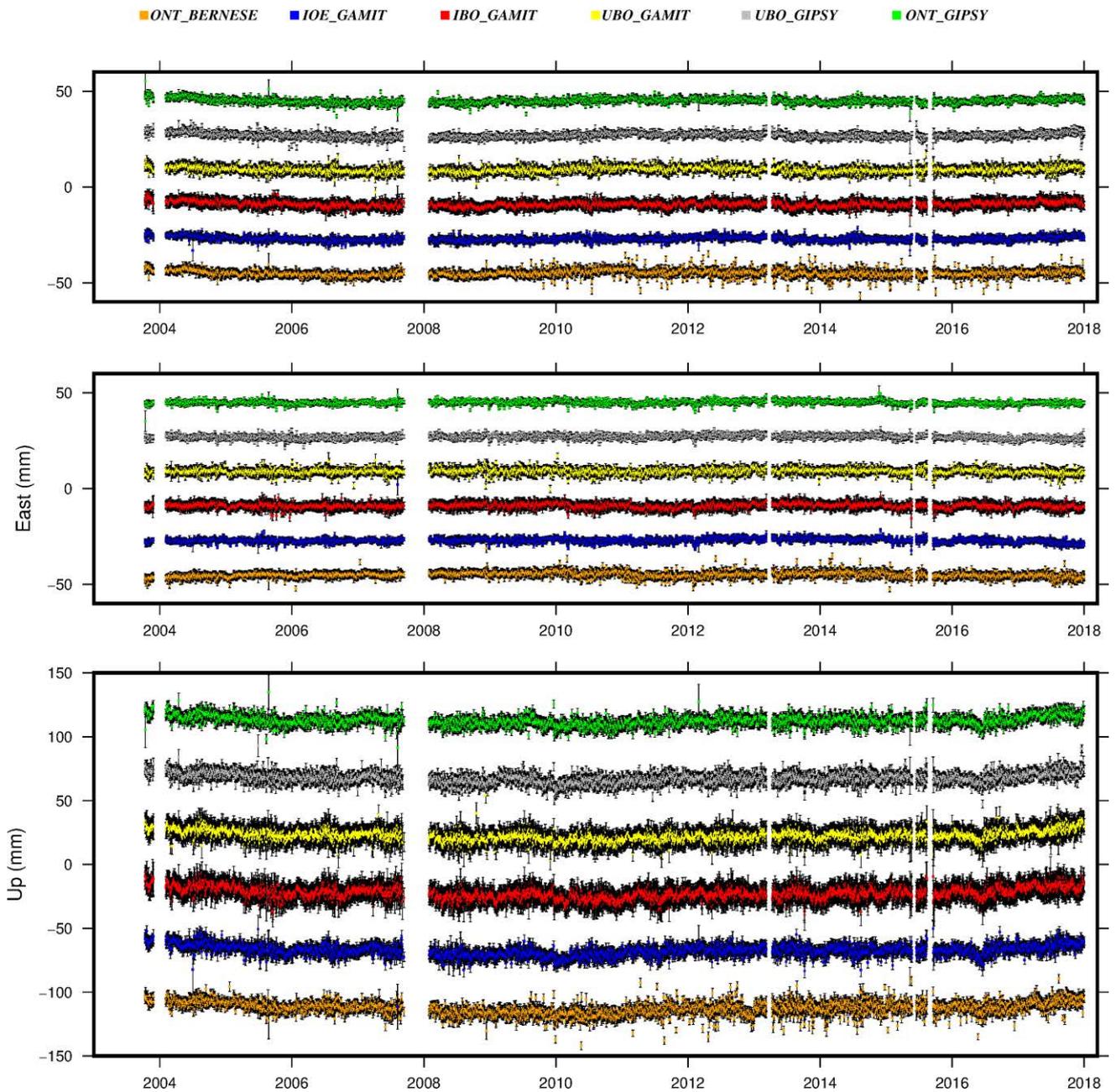


Figura L4-4 - Esempio di confronto tra le differenti serie temporali ottenute per la stazione AGOB. Figura estratta da Palano et al., 2020.

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

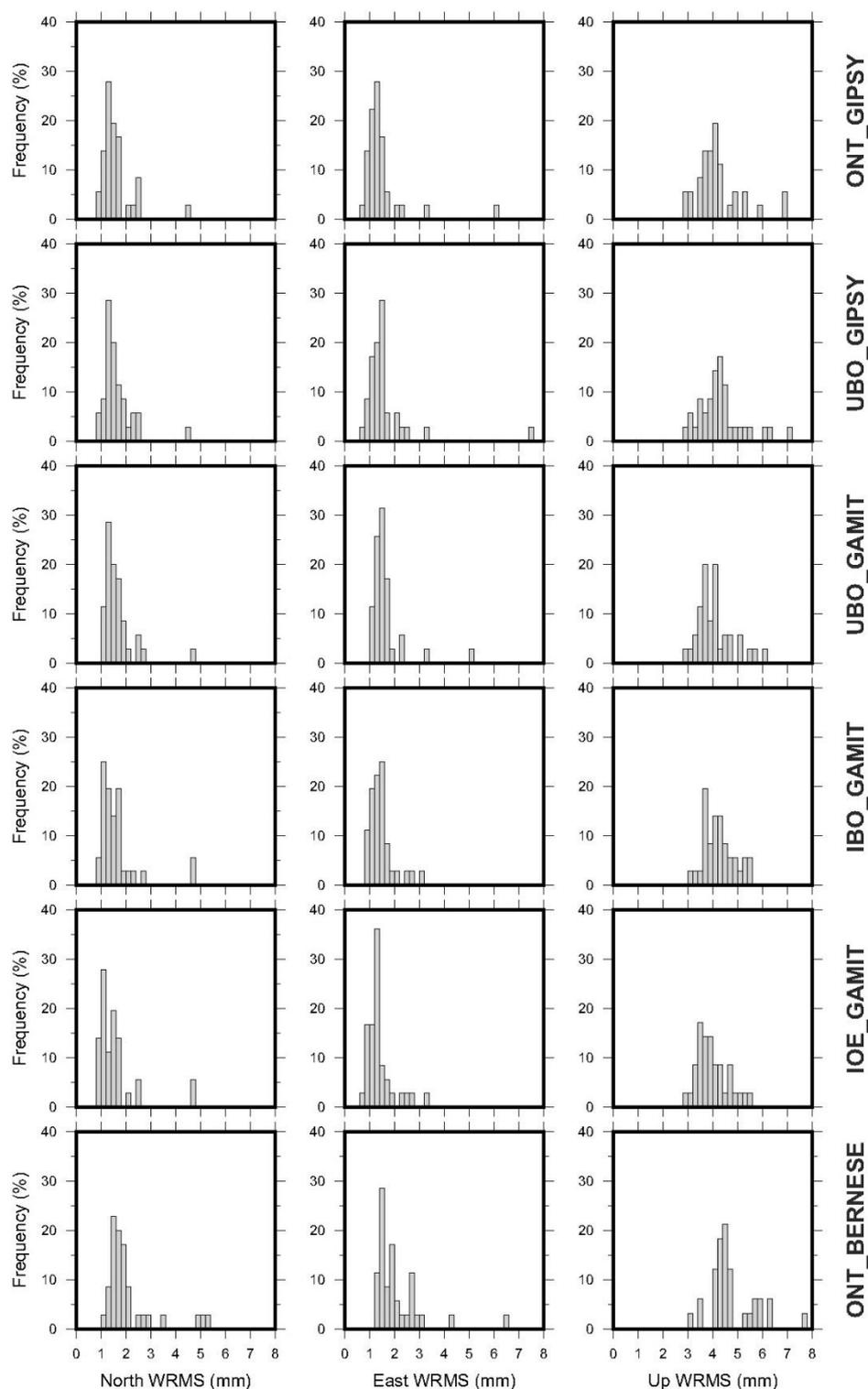


Figura L4-5 – Istogramma di frequenza dei valori di WRMS per le componenti North, East e Up. Figura estratta da Palano et al., 2020.

Per quanto concerne le componenti annuali e semi-annuali, tutte le serie temporali esaminate contengono segnali significativi sia nella direzione orizzontale che in quella verticale. I valori stimati per ciascuna soluzione mostrano un ampio accordo tra loro; le ampiezze annuali variano tra i valori di 0.5-5.3 mm per le componenti orizzontali e tra i valori di 3-8 mm per la componente verticale, con valori elevati osservati nei siti installati nelle piattaforme offshore. Le ampiezze semi-annuali sono generalmente < 0,5 mm per le

componenti orizzontali e ~1 mm per la componente verticale. Per quanto riguarda i segnali annuali, la maggior parte dei siti installati sulle piattaforme offshore mostrano ampiezze massime nei mesi di gennaio, settembre e agosto per le componenti Nord, Est e Up, rispettivamente. Inoltre, la maggior parte di questi siti (specialmente quelli vicini alla zona costiera) è soggetta ad oscillazioni orizzontali con assetto prevalente NNW-SSE e ad oscillazioni verticali associate ad uplift durante l'estate ed alla subsidenza durante l'inverno. I siti installati lungo la costa sono caratterizzati da ampiezze massime ampiamente disperse e pertanto non è possibile riconoscere chiari patterns di oscillazione. Per quanto riguarda i segnali semi-annuali, la maggior parte dei siti mostra ampiezze massime concentrate tra luglio e settembre per la componente Nord e tra aprile e giugno per entrambe le componenti Est ed Up. Ulteriori caratteristiche sui segnali stagionali sono fornite considerando i diagrammi fasoriali delle ampiezze ed i segnali di fase (vedere l'esempio riportato in Figura L4-6).

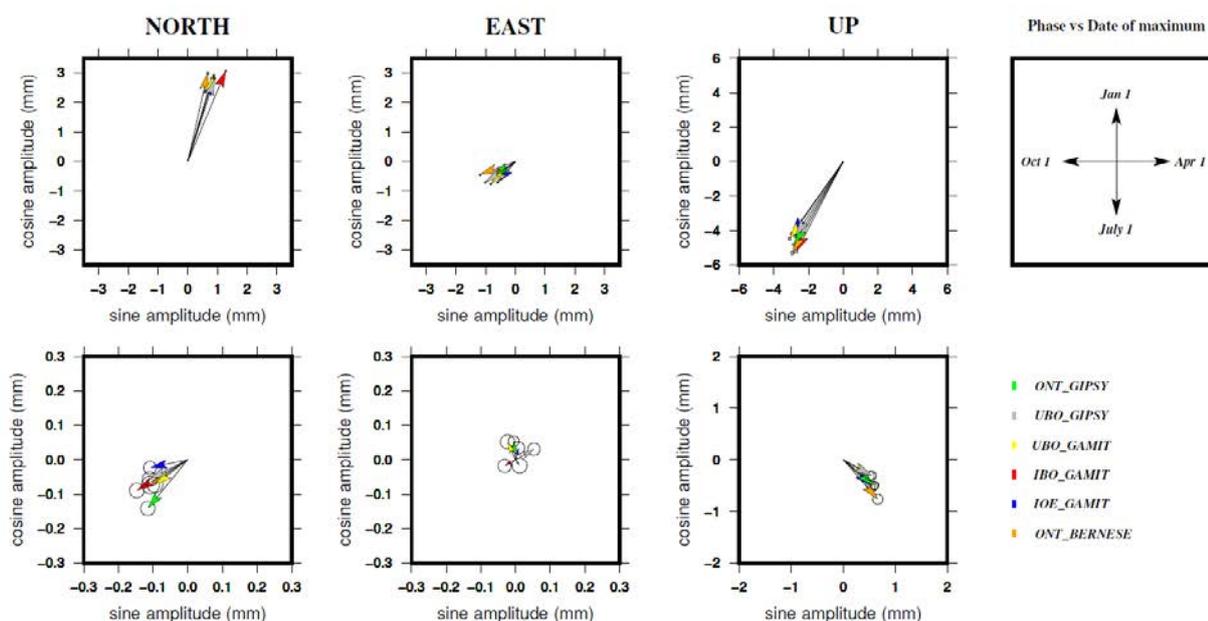


Figura L4-6 - Esempio di diagrammi fasoriali dei segnali annuali (in alto) e semestrali (in basso) per la stazione AGOB (vedi Tabella L4-1). Le ampiezze dei parametri seno e coseno stimati (vedere l'equazione 1) vengono tracciate per le componenti Nord, Est e Up. Il grafico in alto a destra permette di correlare la direzione della fase massima con il periodo dell'anno. Le fasi sono riferite al 1 gennaio e il tempo aumenta in senso orario. Figura estratta da Palano et al., 2020.

Alcune serie temporali (registrate principalmente alle stazioni situate sulle piattaforme offshore) presentano una forma curva, mentre altre mostrano un debole decadimento post-sismico (registrato da poche stazioni situate lungo la zona costiera, ad est rispetto all'area epicentrale della sequenza sismica del 2016). Entrambe le caratteristiche determinano deviazioni dalla tendenza lineare; per quantificare tale deviazione per ogni serie temporale, abbiamo definito un indice di non linearità (I_{NL}), dato dal rapporto tra la deviazione standard delle serie temporali smussate e la deviazione standard del suo rumore intrinseco:

$$I_{NL} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |F_i - \bar{F}|}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |R_i - \bar{R}|}} \quad (2)$$

dove $i = 1 \dots N$ è il numero di dati, F e R (con valori medi \bar{F} e \bar{R}) sono le osservazioni smussate e residuali. Le serie temporali smussate dovrebbero approssimare il comportamento non-lineare a bassa frequenza, mentre le serie temporali residue (calcolate come differenza tra le serie temporali non smussate e quelle smussate) contengono la maggior parte del rumore ad alta frequenza, e dovrebbero essere considerate come un buon indicatore del rumore intrinseco della stazione. Pertanto, tenendo conto delle serie storiche già "pulite" da una velocità media a partire dall'equazione (1), abbiamo calcolato le serie storiche a bassa

frequenza applicando un filtro a media mobile con un arco temporale di 1 anno, il relativo tempo residuale delle serie ed infine, i valori di I_{NL} (riportati in Tabella L4-5).

Le stime dell'indice I_{NL} su un insieme di stazioni IGS di alta qualità (Tabella L4-2) evidenziano che i valori < 0.5 riflettono serie temporali con comportamento lineare puro, quindi abbiamo classificato arbitrariamente come 'lievemente' e 'moderatamente' non-lineari tutte quelle serie temporali con indice $0.5 \leq I_{NL} \leq 1$ e $I_{NL} > 1$, rispettivamente (Tabella L4-5). Sulla base di questa semplice definizione ed escludendo la stazione FRAT a causa della sua breve serie temporale, 11 stazioni sono generalmente caratterizzate da serie temporali lineari (per tutte e tre le componenti) mentre le altre sono caratterizzate da serie temporali lievemente (19 stazioni) e moderatamente non-lineari (6 stazioni), ad una o più componenti.

Le stazioni con serie temporali lievemente e moderatamente non-lineari si concentrano principalmente nell'offshore del Mare Adriatico settentrionale ed onshore, lungo la fascia costiera, mentre quelle con serie temporali lineari si trovano principalmente lungo la costa onshore.

Site	North	East	Up
AGOB	0.61 ± 0.08	0.41 ± 0.09	0.74 ± 0.07
AMEB	0.19 ± 0.08	0.55 ± 0.22	0.45 ± 0.18
ANBL	0.71 ± 0.11	0.61 ± 0.13	0.90 ± 0.12
ANEB	0.97 ± 0.25	0.34 ± 0.10	0.36 ± 0.14
ANGA	1.04 ± 0.39	1.09 ± 0.40	1.61 ± 0.69
ANLS	0.30 ± 0.05	0.51 ± 0.20	0.66 ± 0.21
ANTA	0.54 ± 0.06	0.76 ± 0.12	0.79 ± 0.17
ANTO	0.46 ± 0.06	0.39 ± 0.07	0.33 ± 0.08
ARIA	1.15 ± 0.13	0.35 ± 0.10	0.70 ± 0.10
ARMI	0.40 ± 0.05	0.53 ± 0.08	0.40 ± 0.05
AZAB	0.34 ± 0.07	0.33 ± 0.10	0.49 ± 0.06
BRIS	0.48 ± 0.19	0.39 ± 0.14	0.28 ± 0.04
CERA	2.48 ± 1.09	0.72 ± 0.47	0.50 ± 0.26
CLAE	1.82 ± 0.11	1.30 ± 0.28	0.37 ± 0.03
CROT	0.98 ± 0.23	0.47 ± 0.15	0.51 ± 0.05
ELEO	0.32 ± 0.08	0.24 ± 0.07	0.17 ± 0.05
EMIL	0.30 ± 0.09	0.34 ± 0.05	0.28 ± 0.04
FALC	0.36 ± 0.05	0.29 ± 0.03	0.26 ± 0.05
FANO	0.54 ± 0.03	0.48 ± 0.10	0.28 ± 0.10
FAUZ	0.10 ± 0.03	0.24 ± 0.05	0.32 ± 0.03
FIUN	1.44 ± 0.26	3.11 ± 1.11	1.26 ± 0.09
FRAT	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
GARB	0.59 ± 0.14	0.71 ± 0.18	0.82 ± 0.07
GARC	0.58 ± 0.33	0.52 ± 0.42	0.67 ± 0.33
GRTM	0.21 ± 0.05	0.23 ± 0.03	0.17 ± 0.04
ITGS	0.77 ± 0.10	0.82 ± 0.10	0.33 ± 0.06
MANA	0.52 ± 0.09	0.55 ± 0.13	0.26 ± 0.04
NAID	0.40 ± 0.09	0.45 ± 0.06	0.53 ± 0.05
NAPA	0.40 ± 0.11	0.72 ± 0.14	0.29 ± 0.07
PCCP	0.42 ± 0.07	0.46 ± 0.13	0.40 ± 0.08
PCTA	1.16 ± 0.19	1.08 ± 0.30	0.79 ± 0.12
PCWC	0.36 ± 0.11	0.34 ± 0.07	0.77 ± 0.23
PINE	0.28 ± 0.04	0.23 ± 0.05	0.22 ± 0.04
RUBI	0.48 ± 0.05	0.54 ± 0.06	0.69 ± 0.07
SMAR	0.28 ± 0.07	0.45 ± 0.09	0.60 ± 0.08
TEAL	1.14 ± 0.09	1.10 ± 0.19	0.71 ± 0.13
TREV	0.26 ± 0.07	0.29 ± 0.07	0.23 ± 0.06

Tabella L4-5 - Valori dell'indice di non linearità I_{NL} (e deviazione standard) per le serie analizzate.

In uno step finale abbiamo confrontato i trend lineari delle componenti Nord, Est ed Up calcolati per ciascuna soluzione; queste analisi (ed i relativi risultati) devono essere considerate con estrema cautela a causa del movimento non lineare osservato a molte delle stazioni analizzate. In una prima fase, abbiamo calcolato i valori residuali rispetto a quelli medi per ogni soluzione e per ciascuna componente (Tabella L4-6). Per quanto riguarda la componente Nord, le soluzioni IBO_GAMIT, IOE_GAMIT e ONT_GIPSY mostrano valori fino a 0.2 mm inferiori rispetto ai valori medi, mentre la soluzione ONT_BERNESE mostra valori fino a 0.4 mm maggiori dei valori medi; le soluzioni UBO_GAMIT e UBO_GIPSY mostrano valori centrati (± 0.1

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

mm) sui valori medi. Per quanto riguarda la componente Est, le soluzioni IBO_GAMIT, IOE_GAMIT e ONT_BERNESE mostrano valori fino a 0.2 mm più grandi dei valori medi, mentre la soluzione ONT_GIPSY mostra valori fino a 0.4 mm più piccoli dei valori medi; UBO_GAMIT e UBO_GIPSY riportano valori centrati (± 0.1 mm) sui valori medi. Per quanto riguarda la componente Up, le soluzioni IBO_GAMIT, IOE_GAMIT, UBO_GAMIT e UBO_GIPSY mostrano valori prevalenti fino a 0.6 mm maggiori rispetto ai valori medi, mentre le soluzioni ONT_GIPSY e ONT_BERNESE mostrano valori prevalenti fino a 0.4 mm inferiori ai valori medi; le differenze complessive ricadono nell'intervallo di valori compreso tra -0.6 e 0.6 mm.

Site	North	East	Up
AGOB	16.77 \pm 0.19	22.62 \pm 0.12	-7.14 \pm 0.42
AMEB	17.38 \pm 0.24	20.52 \pm 0.18	-3.07 \pm 0.41
ANBL	18.32 \pm 0.16	21.96 \pm 0.15	-3.74 \pm 0.38
ANEB	17.79 \pm 0.06	20.98 \pm 0.18	-4.80 \pm 0.40
ANGA	19.41 \pm 0.22	22.16 \pm 0.14	-17.56 \pm 0.52
ANLS	18.12 \pm 0.17	21.18 \pm 0.18	-4.23 \pm 0.34
ANTA	18.14 \pm 0.19	20.74 \pm 0.16	-4.91 \pm 0.35
ANTO	18.45 \pm 0.16	21.34 \pm 0.16	-2.26 \pm 0.41
ARIA	17.84 \pm 0.20	23.18 \pm 0.18	-10.79 \pm 0.56
ARMI	17.75 \pm 0.13	21.94 \pm 0.16	-4.39 \pm 0.41
AZAB	18.65 \pm 0.18	22.18 \pm 0.15	-3.64 \pm 0.39
BRIS	18.96 \pm 0.17	23.09 \pm 0.16	1.55 \pm 0.39
CERA	18.32 \pm 0.19	22.74 \pm 0.13	-11.66 \pm 0.36
CLAE	15.73 \pm 0.15	21.25 \pm 0.15	-14.31 \pm 0.37
CROT	17.73 \pm 0.18	27.24 \pm 0.10	-0.24 \pm 0.60
ELEO	17.98 \pm 0.16	23.11 \pm 0.10	0.08 \pm 0.52
EMIL	18.23 \pm 0.10	23.13 \pm 0.21	-1.89 \pm 0.31
FALC	18.46 \pm 0.13	23.00 \pm 0.17	-0.15 \pm 0.38
FANO	18.91 \pm 0.14	22.40 \pm 0.16	0.15 \pm 0.38
FAUZ	19.77 \pm 0.20	20.55 \pm 0.26	-5.65 \pm 0.47
FIUN	15.56 \pm 0.19	28.72 \pm 0.09	-14.18 \pm 0.43
GARB	17.77 \pm 0.18	20.98 \pm 0.14	-7.06 \pm 0.42
GARC	17.15 \pm 0.08	19.73 \pm 0.08	-8.56 \pm 0.28
GRTM	18.50 \pm 0.10	23.68 \pm 0.15	-0.30 \pm 0.30
ITGS	19.07 \pm 0.09	22.70 \pm 0.14	0.13 \pm 0.36
MANA	17.33 \pm 0.17	21.59 \pm 0.14	-2.98 \pm 0.46
NAID	17.82 \pm 0.17	20.51 \pm 0.15	-3.53 \pm 0.42
NAPA	17.56 \pm 0.20	21.45 \pm 0.08	-1.52 \pm 0.34
PCCP	16.84 \pm 0.18	23.29 \pm 0.15	-4.14 \pm 0.38
PCTA	19.65 \pm 0.18	23.86 \pm 0.11	-7.57 \pm 0.40
PCWC	17.01 \pm 0.21	22.11 \pm 0.04	-5.30 \pm 0.51
PINE	18.64 \pm 0.10	23.18 \pm 0.18	-0.74 \pm 0.35
RUBI	19.39 \pm 0.13	22.13 \pm 0.16	-2.28 \pm 0.36
SMAR	18.39 \pm 0.21	20.94 \pm 0.05	-6.54 \pm 0.47
TEAL	18.21 \pm 0.16	19.76 \pm 0.16	-4.55 \pm 0.39
TREV	17.23 \pm 0.16	20.51 \pm 0.15	-0.10 \pm 0.44

Tabella L4-6 - Valori medi del trend per le componenti Nord, Est e Up. I valori di deviazione standard sono anche riportati. Nessuna stima è stata fatta per la stazione FRAT a causa della sua breve serie temporale.

In una seconda fase, abbiamo calcolato per ogni soluzione il campo di velocità rispetto ad un sistema di riferimento eurasiatico; i risultati ottenuti sono riportati in Figura L4-7. Per la sua semplice definizione, tale rotazione interessa solo le velocità orizzontali; quindi, quelle verticali sono rimaste vincolate nel loro precedente sistema di riferimento. Considerando la velocità orizzontale, tutte le soluzioni mostrano un accordo generale in termini di azimuth e di magnitudo; tuttavia, la soluzione ONT_BERNESE mostra una rotazione sistematica in senso antiorario rispetto agli altri, probabilmente legata ai vincoli adottati per la definizione del sistema di riferimento (Tabella L4-2). La maggior parte delle stazioni installate lungo l'area costiera onshore mostra un modello di velocità prevalentemente orientato NNW, il quale risulta essere altamente coerente con il campo di deformazione regionale. Le stazioni installate lungo l'offshore adriatico mostrano un campo di deformazione molto complesso, caratterizzato da notevoli variazioni sia in azimuth che in magnitudo (Figura L4-7).

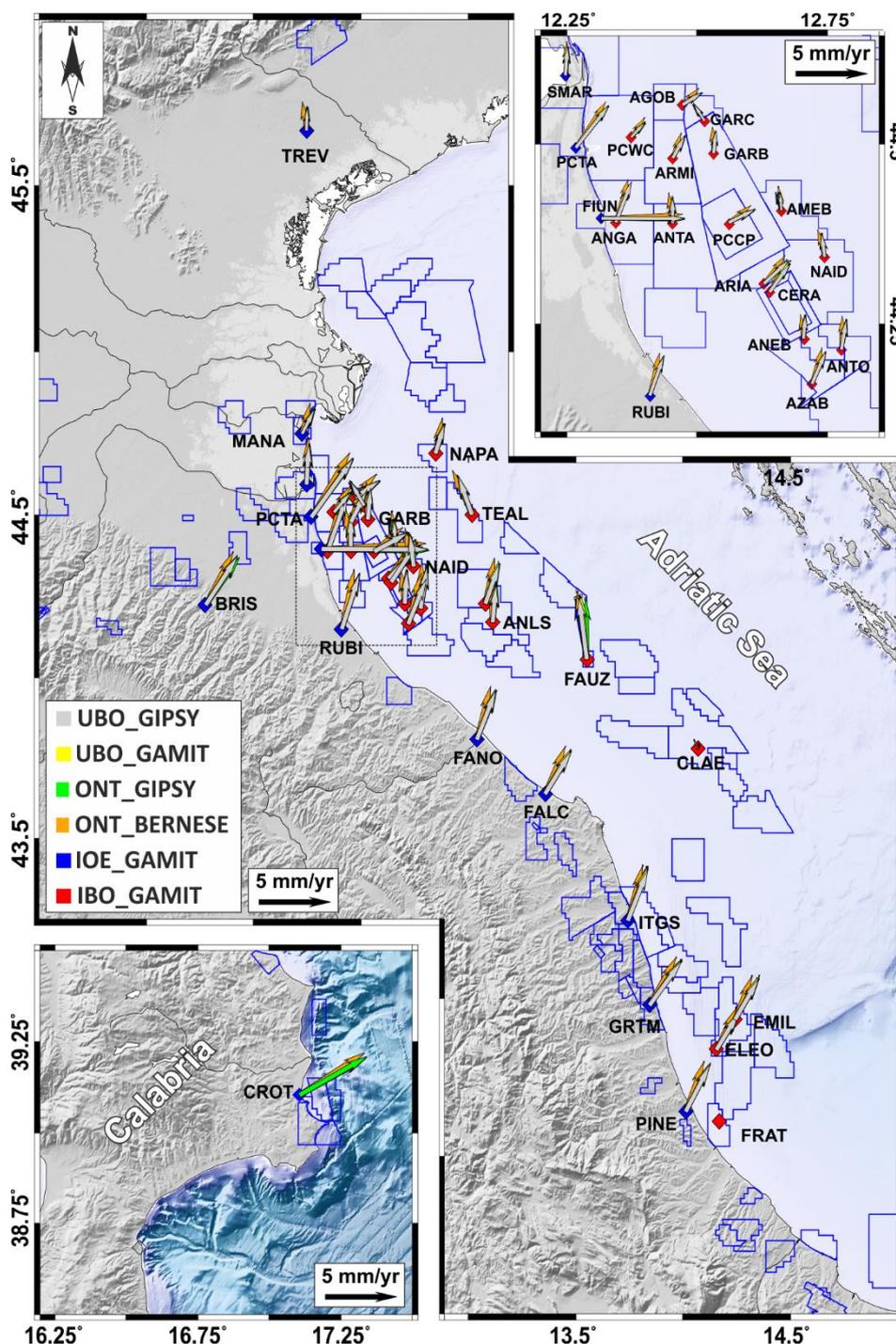


Figura L4-7 - Confronto tra i campi di velocità orizzontali. Le velocità sono riferite ad un sistema di riferimento euroasiatico. Inset in basso: zoom sulla regione Calabria; inset in alto: zoom dell'area Adriatica. Figura estratta da Palano et al., 2020.

Le velocità verticali sono riportate come valori medi in Figura L4-8a e come differenze rispetto ai valori medi in Figura L4-8b. La Figura L4-8a mostra che la maggior parte delle stazioni installate lungo la zona costiera onshore è caratterizzata da subsidenza con velocità fino a 2 mm/anno in accordo con studi recenti, mentre tutte le stazioni installate sulle piattaforme offshore mostrano un cedimento generale con velocità fino a ~ 17 mm/anno (vedasi anche Tabella L4-6). I confronti sito per sito riportati in Figura L4-8b confermano le caratteristiche precedentemente riconosciute: le soluzioni ONT_GIPSY e ONT_BERNESE sono

generalmente inferiori ai valori medi, mentre le altre soluzioni sono maggiori dei valori medi. Queste differenze sembrano legate al sistema di riferimento adottato (la soluzione ONT_GIPSY è riferita al sistema di riferimento IGS14) e/o ai vincoli imposti per la trasformazione del sistema di riferimento (la soluzione ONT_BERNESE adotta una trasformazione di Helmert basata solo su 4 parametri).

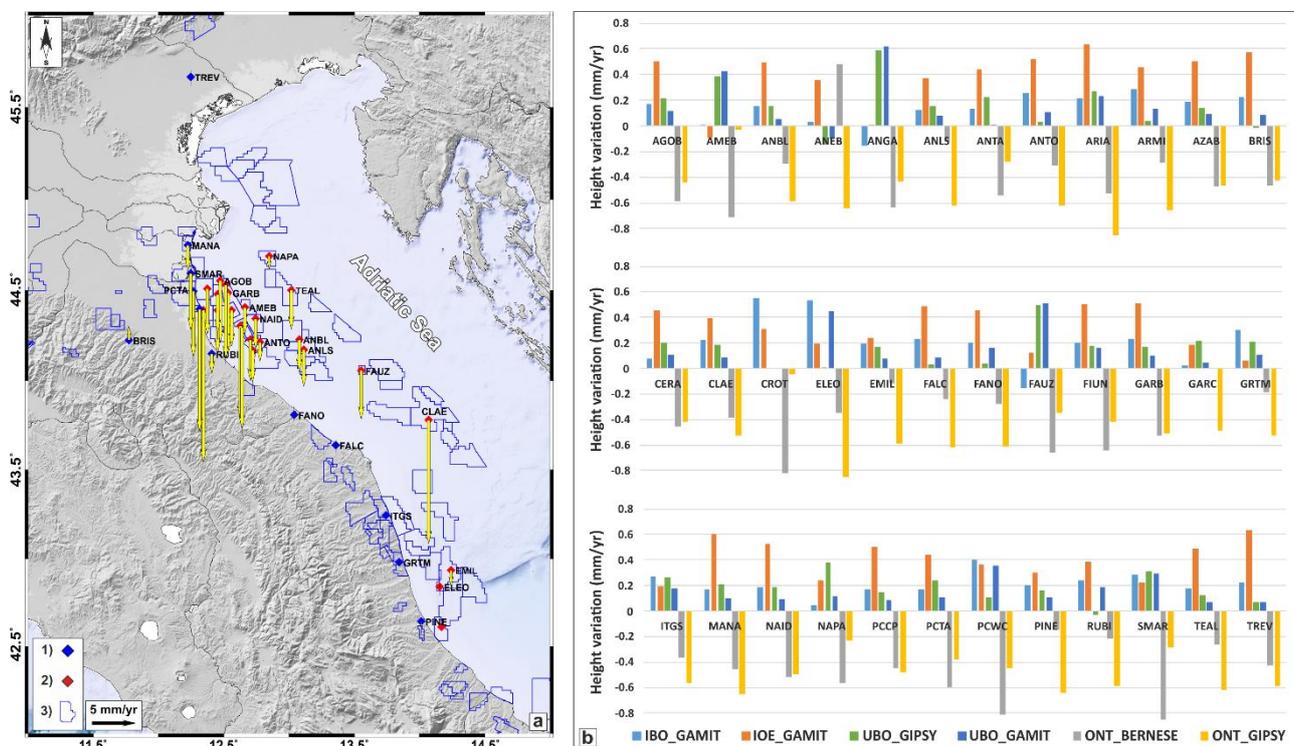


Figura L4-8 - a) Campo di deformazione verticale (valori riportati in Tabella 6). b) Confronto dei valori residuali rispetto ai valori medi di velocità verticali. Figura estratta da Palano et al., 2020.

In conclusione, l'intero set di dati GNSS è stato elaborato mediante ausilio di software scientifici di alto livello, seguendo i più elevati standard di analisi riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale, ottenendo 6 soluzioni distinte. Da ciascuna soluzione sono state estratte le serie temporali delle posizioni tridimensionali e le incertezze associate; dal confronto tra le diverse serie temporali si evince che esse sono caratterizzate da elevato grado di ripetibilità su base giornaliera, elevata congruenza dell'ampiezza e del periodo delle componenti stagionali, e elevata congruenza dei valori di offset per ciascun offset osservato, evidenziando come le diverse soluzioni delle serie temporali sono altamente coerenti tra loro nonostante l'uso di diversi software, modelli, strategia di elaborazione e sistemi di riferimento. Inoltre, sulla base dei risultati ottenuti, la tecnica di misura basata sul sistema satellitare globale di navigazione GPS rappresenta una valida tecnica per la misura ed il monitoraggio della subsidenza in aree offshore. La subsidenza del fondo marino rappresenta un elemento di forte criticità per le aree costiere ed avere un forte impatto sul tessuto infrastrutturale, economico, ambientale e sociale dell'area interessata. In contesti ove le attività estrattive avvengono in prossimità dell'area costiera, l'installazione di stazioni GPS operanti in continuo su infrastrutture posizionate sia in aree off-shore che onshore rappresenta un importante frame al quale riferire le misure ottenute con altre tecniche (SAR; livellazione).

Linea di ricerca 5 - Modellazione statica e dinamica nell'onshore Ravennate per i prelievi di acqua e nell'Adriatico Settentrionale per l'estrazione di gas da una concessione scelta come caso di studio (RSE S.p.A.).

L'attività della linea di ricerca 5 si è concentrata su due attività:

1. studio dell'area onshore situata in prossimità di Ravenna (area 1 in Figura L5-1) al fine di indagare i cedimenti, legati al fenomeno di subsidenza, conseguente al prelievo di acqua sotterranea. Tale area è stata indagata sulla base dei dati messi a disposizione dalla regione Emilia – Romagna;
2. studio dei giacimenti offshore di Angela Angelina e Ravenna Mare Sud (area 2 in Figura L5-1) al fine di stimare i cedimenti legati al fenomeno di subsidenza antropica generato dalle attività di produzione di gas. I dati di questi giacimenti sono stati messi a disposizione della Società Eni S.p.A.

Per entrambe le aree è stata utilizzata la metodologia sviluppata da RSE che prevede la realizzazione del:

1. modello Geologico 3D realizzato con Petrel (E&P Software Platform);
2. modello Dinamico 3D realizzato con la suite modellistica RSE – GeoSIAM (Agate G. e Guandalini R., 2018) utilizzando il Tough2RdS (from Tough2 – LBNL Lawrence Berkeley National Laboratory);
3. modello Geomeccanico 3D realizzato con PyLith – 3D Geomechanics (Computational Infrastructure for Geodynamics at the University of California at Davis) (Aagaard et al., 2013 e 2017).

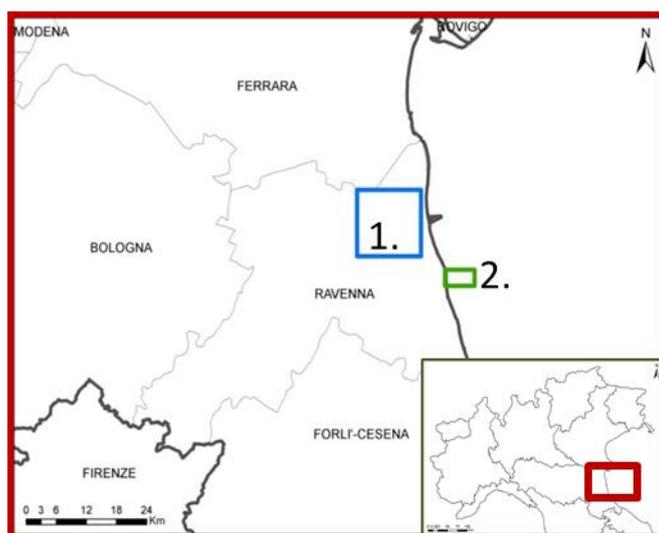


Figura L5-1 - Rappresentazione schematica dei casi studio scelti per la linea di ricerca 5 attività 1 (box blu relativo all'onshore ravennate) e l'attività 2 (box verde relativo alla concessione A.C. 27 EA nella zona di Fiumi Uniti, Lido di Dante).

Per quanto riguarda l'area di studio afferente all'attività 1, i dati disponibili, messi a disposizione dalla regione Emilia-Romagna, sono i seguenti:

- mappe di inquadramento dell'area di studio (es. carta topografica, ortofoto scattata nel 2017, carta geologica e strutturale dell'area);
- 14 sezioni geologiche e idrogeologiche profonde di cui 7 dal progetto CARG;
- sondaggi presenti nella Banca Dati Geognostici della Regione Emilia-Romagna. Nel dettaglio, 612 pozzi sono stati censiti nell'area di studio e hanno profondità massima di circa 400 m;
- dati relativi ai 180 pozzi nell'area di studio utilizzati per il prelievo delle acque sotterranee;
- 14 piezometri con le relative misure piezometriche effettuate nel tempo (con frequenza di campionamento variabile da annuale a mensile).

In Figura L5-2 sono riportati i dettagli dei 180 pozzi presenti nell'area di studio suddivisi in funzione dei diversi utilizzi dell'acqua estratta e rappresentati per i 5 anni utilizzati nell'analisi (1975, 1990, 2000, 2010, 2017).

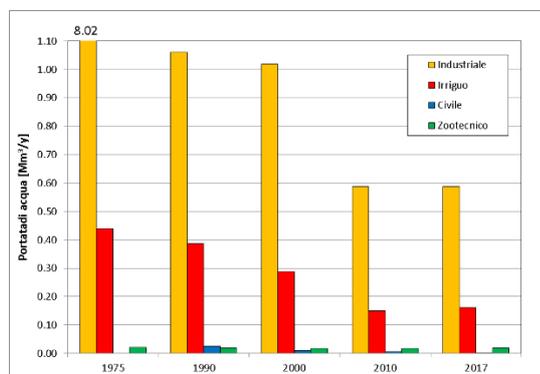


Figura L5-2 - Volumi in (Mm³/anno) di estrazione di acqua nell'area di studio classificati per funzione e uso (in giallo uso industriale, rosso, irrigazione, blue per usi civili, verde per allevamento) (fonte del dato Agenzia Regionale per la protezione ambientale e l'energia – ARPAE, Emilia-Romagna).

Le attività di sviluppo del modello geologico statico 3D hanno riguardato la raccolta e l'importazione di tutti i dati (resi disponibili dalla Regione Emilia-Romagna e descritti precedentemente) nel codice Petrel™ della Schlumberger, nell'elaborazione e nella realizzazione delle superfici relative ai top delle unità stratigrafiche presenti nell'area, nella creazione dei volumi per ciascuna unità stratigrafica e infine nell'attribuzione delle caratteristiche petro-fisiche (Figura L5-3 lettere a-c).

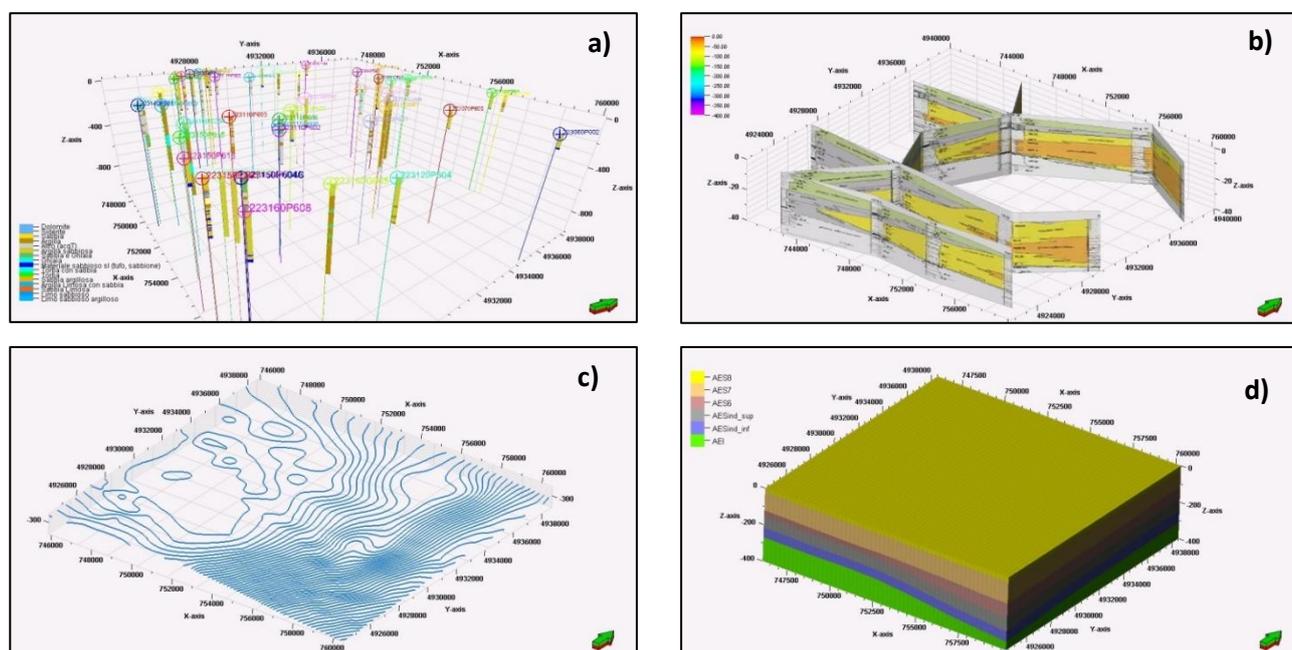


Figura L5-3 Flusso di lavoro seguito per la creazione del modello geologico statico 3D attraverso l'uso del software Petrel™ della Schlumberger. Lettera a) importazione dei dati di pozzo b) confronto dei dati di pozzo con le sezioni geologiche disponibili nell'area di studio; c) elaborazione delle isobate per ciascuna superficie stratigrafica individuata e realizzazione delle rispettive superfici d) realizzazione del modello geologico 3D attraverso la creazione dei volumi per ciascun livello stratigrafico.

Le superfici ottenute seguendo la procedura descritta, corrispondono al top delle seguenti unità:

- AES8, "Subsintema di Ravenna";
- AES7, "Subsintema di Villa Verrucchio";

- AES6, “*Subsintema di Bazzano*”;
- AESind_sup, “*Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore indifferenziato superiore*”;
- AESind_inf, “*Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore indifferenziato inferiore*”;
- AEI, “*Sintema Emiliano-Romagnolo inferiore*”.

In seguito, sono state aggiunte altre due superfici, la prima, che chiude superiormente il dominio, posta a 0 metri e corrispondente al piano campagna e l'altra posta a -400 metri che chiude il modello alla base. Il modello ottenuto è riportato in Figura L5-3 lettera d).

Successivamente, al fine di stimare i cedimenti legati al fenomeno di subsidenza conseguente l'emungimento dell'acqua delle falde sotterranee superficiali, sono state realizzate le simulazioni numeriche 3D atte a indagare il comportamento fluidodinamico e geomeccanico. Tali simulazioni, in funzione della disponibilità dei dati relativi ai volumi di acqua estratti ed associabili ai singoli pozzi, sono state eseguite per cinque differenti anni: 1975, 1990, 2000, 2010 e 2017. Purtroppo non è stato possibile eseguire una simulazione che riproducesse l'intero periodo 1975 – 2017 per la mancanza dei dati puntuali di emungimento associabili ai pozzi. La griglia di calcolo tridimensionale utilizzata per le simulazioni fluidodinamiche è stata generata a partire dal modello geologico statico 3D e da un reticolo 2D generato con GMSH (Geuzaine e Remacle, 2010) La griglia 2D di base per il dominio modellato, estesa circa 20 km × 20 km nelle direzioni x e y, è rappresentata in Figura L5-4. Da questa griglia di base è stata generata una griglia 2D equivalente, ottenuta da GeoSIAM creando una tassellatura secondo Voronoi, 1908. In questo modo, la griglia equivalente è costituita da elementi piani di tipo poligonale con un massimo di 20 lati. La proprietà caratterizzante questo tipo di griglia computazionale consiste nell'avere i lati di connessione ortogonali alle congiungenti dei centri di massa, come richiesto dal metodo di discretizzazione alle differenze finite integrali utilizzato dal simulatore. Contestualmente alla generazione della griglia equivalente, avviene l'inserimento delle strutture di pozzo che nel caso in esame è consistito in 106 strutture. Ciascun pozzo è stato simulato con diversi tratti aperti per il prelievo di acqua situati in corrispondenza dei livelli sabbiosi. La massima profondità di emungimento è di -320 metri.

La griglia 2D finale così ottenuta è riportata in Figura L5-4 a) ed è costituita da 4725 elementi, 7507 nodi e 12187 connessioni attive tra gli elementi. In prossimità dei pozzi è stato effettuato un affinamento di griglia, creando degli anelli concentrici di 8 elementi ciascuno attorno alle celle di pozzo (Figura L5-4 b). Al fine di evitare problemi numerici legati alla vicinanza dei pozzi di emungimento al bordo del dominio si fa notare che il dominio di calcolo utilizzato ha un'estensione maggiore rispetto all'area di studio considerata.

Gli elementi Voronoi bidimensionali vengono, successivamente, estrusi lungo la direzione verticale (asse z) fino alla base del dominio di calcolo che è stata fissata ad una profondità di -400 m. In questo modo viene costruito un primo reticolo tridimensionale “a colonne” che viene poi suddiviso in un numero prefissato di strati verticali di spessore variabile regolati sulla base della struttura delle formazioni geologiche presenti nel dominio. In questo caso sono stati considerati 98 strati verticali di discretizzazione, il cui spessore varia in funzione dello spessore locale della formazione attraversata (spessore minimo circa 3 m e spessore massimo pari a 10 m). La necessità di affinare il reticolo in prossimità delle numerose strutture di pozzo e di modellare con accuratezza la forma delle superfici di separazione tra le diverse formazioni, mantenendo nel contempo una dimensione della griglia in termini di numero di elementi totali sufficiente a garantire una ragionevole richiesta di risorse di calcolo, ha richiesto una serie di prove successive prima di arrivare ad elaborare la griglia di calcolo finale 3D che è costituita da 463050 elementi, 745173 nodi e 1652651 connessioni.

Durante la fase di generazione della griglia, il modulo MethodRdS di GeoSIAM, mediante lettura dai files del modello geologico statico 3D provenienti da Petrel, attribuisce ad ogni cella del dominio di calcolo le formazioni geologiche, le eventuali eterogeneità presenti e il valore delle principali proprietà petrofisiche. Il dominio di calcolo 3D popolato con le unità lito-stratigrafiche è rappresentato in Figura L5-5.

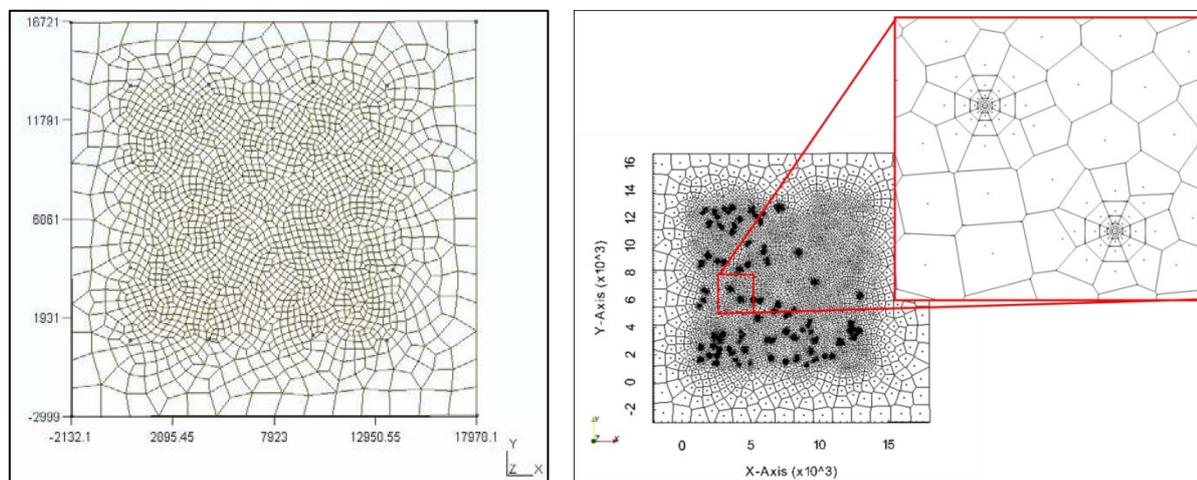


Figura L5-4- a) reticolo di base 2D ad elementi finiti generato con GMSH. b) Reticolo 2D equivalente con tassellatura secondo Voronoi generato con GeoSIAM e ingrandimento di due strutture di pozzo.

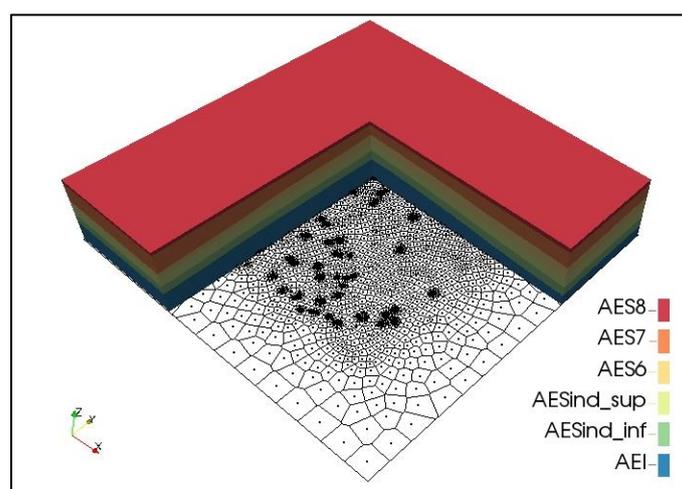


Figura L5-5 - Modello di simulazione 3D generato con GeoSIAM.

Prima di condurre le simulazioni vere e proprie di emungimento dell'acqua di falda, occorre effettuare una fase di inizializzazione, in cui i pozzi non vengono attivati. Questa fase consente di riprodurre la distribuzione iniziale corretta di pressione e di temperatura all'interno del dominio di calcolo. Nel caso specifico, è stato assegnato al piano campagna un valore di temperatura pari a 20°C ed è stato considerato un gradiente di 2.2°C ogni 100 metri di profondità. Per quanto riguarda la pressione è stato attribuito il valore di 1.5 bar al piano campagna ed è stato considerato un gradiente pari a 1 bar ogni 10 metri di profondità. I profili di pressione e temperatura così ottenuti sono rappresentati in Figura L5-6.

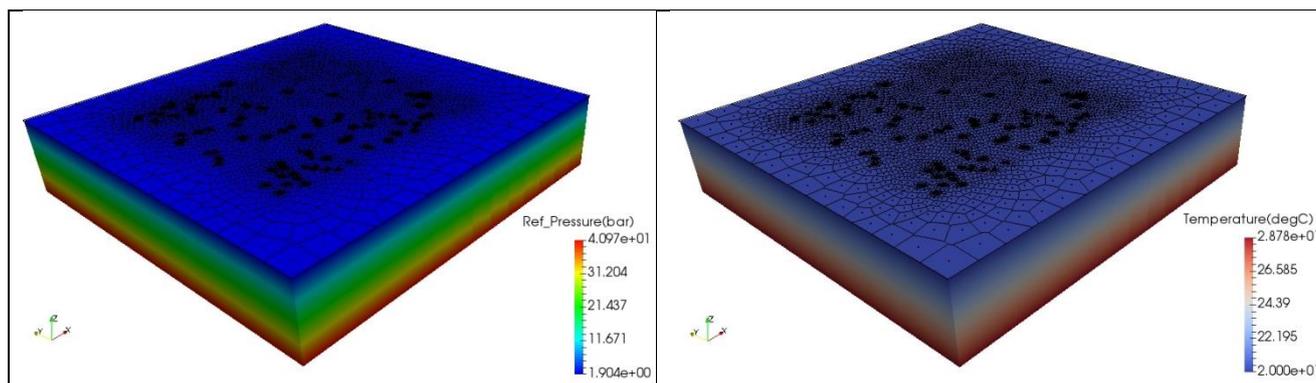


Figura L5-6 - Profili iniziali di temperatura e pressione ottenuti al termine della fase di inizializzazione.

A questo punto, usando il modello geologico realizzato e la griglia computazionale elaborata, partendo dai profili di pressione e temperatura riportati in Figura L5-6, sono state effettuate le simulazioni di emungimento dell'acqua di falda.

Successivamente, a partire dai risultati delle simulazioni fluidodinamiche sono state eseguite le simulazioni atte a indagare il comportamento geomeccanico e quindi l'entità dei cedimenti verticali dovuti all'estrazione di acqua dal sottosuolo. Come anticipato, in funzione della disponibilità dei dati relativi ai volumi di acqua estratti, sono state eseguite cinque differenti simulazioni che sono riferite ai 5 anni completi dal punto di vista dei dati sperimentali e precisamente: 1975, 1990, 2000, 2010 e 2017.

I risultati ottenuti dalla modellazione di RSE per la deformazione nell'area onshore di Ravenna nei 5 anni considerati e della correlazione con le analisi INSAR condotte dal CNR IREA, ha portato a formulare diverse considerazioni (Antoncecchi et al., 2021):

- dai valori rilevati nell'area di studio è visibile un contributo dell'estrazione di acqua nei tre anni di riferimento 2000, 2010 e 2017 che varia dal 79% al 21% al 38% rispettivamente. Questi valori sono in linea con le informazioni che si hanno dei volumi estratti negli stessi anni che registrano una sostanziale riduzione dei volumi di acqua estratta da $8.48 \cdot 10^6$ m³/anno nel 1975 a $0.77 \cdot 10^6$ m³/anno nel 2017. Tuttavia, questo risulta essere più evidente nel periodo tra 1975 e il 2000 e meno accentuato tra il 2010 e il 2017 quando i dati mostrano una diminuzione della subsidenza con un conseguente maggiore contributo dell'estrazione di acqua tuttavia non confermato dai volumi estratti;
- nel periodo fra il 2000-2010 si registra un aumento della subsidenza dovuta all'estrazione di acqua e altri fattori. Ad esempio potrebbe essere spiegato da un aumento della compattazione, per maggiore carico dell'edificato e delle infrastrutture specialmente lungo il canale di Ravenna e nelle zone del porto. Il contributo dell'estrazione di acqua nella zona di studio risulta essere maggiormente significativo di quanto ipotizzato da altri studi e si attesta tra il 10 e il 30% della subsidenza totale. Potrebbe essere quindi che tra il 2000 e il 2010 vi sia stato un effetto ritardato delle politiche di riduzione delle acque estratte volute dalla Regione Emilia-Romagna (in accordo con altri autori come Teatini et al. 2006);
- nel periodo compreso tra il 2010 e il 2017 l'effetto dell'estrazione di acqua risulta in un aumento del contributo alla subsidenza totale registrata nell'area che varia tra il 21 e il 38% nonostante la stabilizzazione dei volumi estratti.

La stessa metodologia è stata impiegata per la seconda linea di attività, area denominata 2 in Figura L5-1 e corrispondente alla concessione A.C. 27 EA, al fine di indagare i cedimenti legati all'estrazione di gas. La mole di dati utilizzati per analizzare tale area è nettamente superiore e ha consentito di realizzare un modello geologico statico 3D, in Petrel, costituito da 313 livelli.

La successiva simulazione numerica del giacimento indagato è stata realizzata utilizzando il simulatore ToughRDS di GeoSIAM e nel dettaglio è stato adoperato il modulo di stato EosExEos7c a due fasi (liquida e gassosa) e componenti acqua, brine, gas non condensabile NCG, metano più la componente calore. La

simulazione numerica è stata realizzata utilizzando il modello 3D dinamico che riproduce la strutturazione del giacimento 3D, i parametri petrofisici associati ad ogni elemento geologico e la storia produttiva del campo intesa come volumi di produzione gas e acqua e volumi di iniezione di acqua in profondità. Nel dettaglio, la simulazione è proceduta per passi successivi e precisamente:

- a) riproduzione dello stato naturale imperturbato - Questa fase è indispensabile per poter poi procedere alle simulazioni numeriche volte a definire il campo di pressione nel giacimento e nei volumi circostanti in quanto vengono definite le condizioni termo-fluidodinamiche del serbatoio in assenza di estrazione/re-iniezione di fluidi;
- b) simulazione degli effetti indotti dal processo di produzione - In questa fase è stato riprodotto l'intero periodo di produzione di gas e acqua dai campi Angela Angelina e Ravenna Mare Sud dal 1965 al 2018 e con passi al 1975, 1985, 1995, 2005, 2015, 2017. La simulazione ha permesso di verificare gli effetti della produzione sul campo di pressione. Si evidenzia che seppur i pozzi siano introdotti come elementi reali nella griglia di calcolo, la procedura numerica adottata non consente di valutare gli effetti dell'estrazione di fluidi sulla struttura di pozzo ma sui volumi circostanti il pozzo.

Al fine di testare anche l'accuratezza delle simulazioni effettuate, nell'ambito delle attività della linea di ricerca 5, è stato anche verificato il match tra i parametri simulati e quelli sperimentali eseguito alla scala di giacimento. Il confronto ha riguardato cinque pozzi relativamente a tre parametri:

1. confronto dei volumi cumulati annuali (osservati e stimati) di gas estratto e suddivisi (in ciascun pozzo) per le stringhe pertinenti;
2. confronto dei volumi cumulati annuali (osservati e stimati) di acqua estratta e suddivisi (in ciascun pozzo) per le stringhe pertinenti;
3. confronto fra le misure di pressione osservate (e fornite da Eni per gli anni 1965, 1975, 1985, 1995, 2005, 2015 e 2018) e quelle stimate al top di un set di tratti aperti presi come riferimento per ciascuno dei pozzi considerati.

Per il primo parametro relativo ai volumi di gas estratto il confronto ha messo in evidenza una buona corrispondenza tra i valori osservati e simulati alla scala di giacimento e in generale ha mostrato una modesta sottostima dei volumi di gas stimati inferiore a -5%. Per il secondo punto relativo ai volumi di acqua estratta si è osservata una leggera sottostima dei volumi annuali di acqua prodotta (comunque accettabile per la scala di giacimento) che si assesta tra -5% e -12.4%. Infine per il terzo punto relativo alle pressioni il match ha illustrato una accettabile differenza fra i valori osservati e stimati ove questi ultimi sono in genere superiori ad esclusione di alcuni top stratigrafici.

Nella tabella seguente (Tabella L5-1) è riportata la sintesi delle stime numeriche per i 6 intervalli temporali più significativi con indicati i valori di subsidenza antropica estratti dalle elaborazioni e relativi rispettivamente ai capisaldi di Fiumi Uniti, piattaforma A/A e al valore massimo offshore di subsidenza antropica stimata nel dominio analizzato; la tabella riporta inoltre anche i risultati ottenuti confrontando il campo di pressione iniziale e imperturbato al 1965 con quello del 2018 che rappresenta un arco di tempo rilevante e superiore ai 50 anni. In sintesi la subsidenza antropica totale calcolata dal 1965 al 2018 nella zona di A/A è di -17.91 cm, di -10.31 cm a Fiumi Uniti e di un massimo offshore di -23.44 cm.

PROGETTO SUBSIDENZA - Report integrato di fine progetto

Periodo	Subsidenza (cm)		
	A/A	MAX _{offshore}	F.Uniti
1965-1975	-0.01	-0.96	-0.03
1975-1985	-0.74	-1.67	-0.7
1985-1995	-0.68	-1.36	-0.63
1995-2005	-6.86	-8.15	-4.62
2005-2015	-7.08	-8.34	-2.98
2015-2018	-2.54	-2.96	-1.35
Totale (cm)	-17.91	-23.44	-10.31
1965-2018	-18.65	-20.93	-9.99

Tabella L5-1 - Risultati ottenuti dagli anni 1965 al 2018 per i 3 siti: piattaforma A/A, max offshore, Fiumi Uniti, dovuto ai punti di prelievo del gas che sono variati nel corso degli oltre 50 anni di produzione.

In sintesi quindi la modellazione condotta nella concessione A.C. 27 EA ha portato a definire una differenza nella subsidenza antropica (SA) più che accettabile fra la somma delle stime parziali e quella totale. La subsidenza antropica simulata in valore assoluto ha un massimo verso mare di circa 2.51 cm, non coincidente con la posizione del GPS sulla piattaforma dove si registra una subsidenza antropica di 0.74 cm. Infine la subsidenza risulta diminuire verso terra dove a Fiumi Uniti registra un valore assoluto di 0.32 cm.

La successiva Tabella riporta la subsidenza antropica stimata numericamente e la relativa velocità di abbassamento media per 4 differenti periodi che corrispondono a tappe significative della storia produttiva del campo e precisamente: 1965-1995 periodo con produzione modesta di gas, 1996-1998 periodo con aumento significativo dei volumi gas e raggiungimento del picco massimo di produzione, 1999-2012 che corrisponde alla diminuzione costante della produzione di gas e 2013-2018 periodo finale analizzato con un modesto incremento nella produzione di gas.

Anno	Fiumi Uniti		A/A		MAX _{offshore}	
	Subsidenza	Velocità	Subsidenza	Velocità	Subsidenza	Velocità
	(mm)	(mm/a)	(mm)	(mm/a)	(mm)	(mm/a)
1965-1995	-16.6	-0.6	-14.3	-0.5	-39.9	-1.3
1996-1998	-29.08	-4.2	-33.11	-6.3	-62.9	-7.7
1999-2012	-89.91	-4.3	-148.48	-8.2	-199.17	-9.7
2013-2018	-103.1	-2.2	-179.1	-5.1	-234.4	-5.9

Tabella L5-2 - Risultati ottenuti della subsidenza cumulata e della velocità di abbassamento dagli anni 1965 al 2018 divisi in 4 periodi per i 3 siti: Fiumi Uniti, piattaforma A/A, max offshore.

Dai dati stimati per i 3 punti di riferimento considerati, si nota che nel periodo iniziale 1965-1995 le differenze sono molto modeste e praticamente l'estrazione del gas produce gli stessi effetti sulla subsidenza antropica con una velocità di abbassamento del suolo superiore per il massimo offshore (-1.3 mm/anno) mentre Fiumi Uniti e piattaforma A/A rispondono in modo quasi uniforme come già riportato in precedenza. Nel periodo 1996-1998 durante il quale è avvenuto l'aumento di produzione gas e raggiunto il picco massimo, si nota un incremento della velocità di abbassamento che è maggiore per la piattaforma A/A e il massimo offshore. Tra il 1999-2012 con la diminuzione della produzione gas, si nota che a Fiumi Uniti la subsidenza antropica e relativa velocità si mantengono in pratica costanti rispetto al periodo precedente che però è di soli 3 anni mentre per i due riferimenti offshore si ha un aumento nell'ordine del +130% circa (+131% per A/A e +127% per il massimo offshore). Nell'ultimo periodo 2013-2018 si nota un marcato rallentamento della subsidenza antropica e relativa velocità per i 3 riferimenti che è più marcato per Fiumi Uniti (circa -50%) e significativo anche per l'offshore (circa -40%) rispetto al periodo precedente. Queste considerazioni sono basate unicamente sui risultati della modellazione numerica mentre per i periodi 1998-2018 e 2001-2018, rispettivamente per Fiumi Uniti e piattaforma A/A, è stato possibile

allineare i risultati numerici con le misure sperimentali fornite da Eni e alcune analisi reperite in letteratura i cui risultati sono esposti rispettivamente nei grafici di Figura L5-7 e Figura L5-8. In Figura L5-7, che si riferiscono a Fiumi Uniti, sono indicate anche delle analisi sperimentali sulla subsidenza totale eseguite da altri autori citati in precedenza e dalle quali si nota una rilevante differenza dei risultati esposti che testimonia la difficoltà intrinseca nell'ottenere risultati univoci. Prendendo come riferimento la serie storica del GPS Eni, è evidente come le analisi svolte per il Lido Adriano da Perini L. (2019) sono ben allineate e la differenza al 2016 è di soli -12.5 mm (circa -0.8 mm/a) e in linea con le incertezze tipiche di simili analisi come indicato in Tabella 5-6 che riporta delle *standard deviation* anche di 2 mm/a per periodi temporali inferiori al 2001-2016. Significativa è la differenza assoluta dei valori di subsidenza totale indicati in Fiaschi (2016) e in Perini L. (2019) per Lido Adriano e Lido Dante che risulta al 2015 rispettivamente di 85 mm e 111 mm circa; si evidenzia inoltre che la subsidenza totale misurata sperimentalmente risulta significativamente più accentuata a Lido Dante rispetto a Lido Adriano.

La serie numerica elaborata da RSE per Fiumi Uniti evidenzia un progressivo appiattimento della subsidenza antropica legata all'estrazione di gas che a fine 2018 raggiunge i -57.84 mm. Alla stessa data al riferimento Eni risulta una subsidenza totale di -229.26 mm per cui la subsidenza antropica simulata numericamente rappresenta il 25% circa della subsidenza totale. Per il riferimento relativo alla piattaforma A/A (Figura L5-8) sono indicate le analisi numeriche svolte da Teatini *et alii* (1997) e Schroot *et alii* (2005) anche se non devono essere considerate come un riferimento puntuale in quanto gli autori non potevano conoscere la storia produttiva del giacimento e neppure avevano misure sperimentali dettagliate di riferimento. Osservando i grafici si nota come i dati da fonte anonima fino al 2010 seguono quelli sperimentali di Eni. La serie numerica elaborata da RSE per la piattaforma A/A mostra un certo appiattimento della subsidenza antropica che inizia negli anni 2007-2008 e a fine 2018 raggiunge i -145.9 mm. Alla stessa data al riferimento Eni risulta una subsidenza totale di -339.3 mm per cui la subsidenza antropica simulata numericamente rappresenta il 43% circa della subsidenza totale. Il massimo della subsidenza offshore, come riferito in precedenza, non coincide con il riferimento Eni e al 2018 la subsidenza antropica raggiunge i -171.48 mm con un incremento di circa 25 mm rispetto al valore simulato per il riferimento sulla piattaforma A/A.

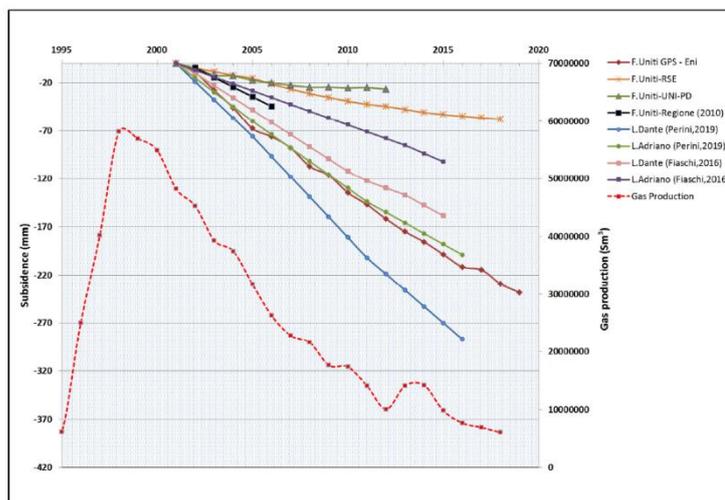


Figura L5-7 - Andamento della subsidenza antropica stimata numericamente (da RSE e UNI-PD) e allineata con le misure sperimentali di Eni per il caposaldo di Fiumi Uniti e con altri dati sperimentali reperiti in letteratura.

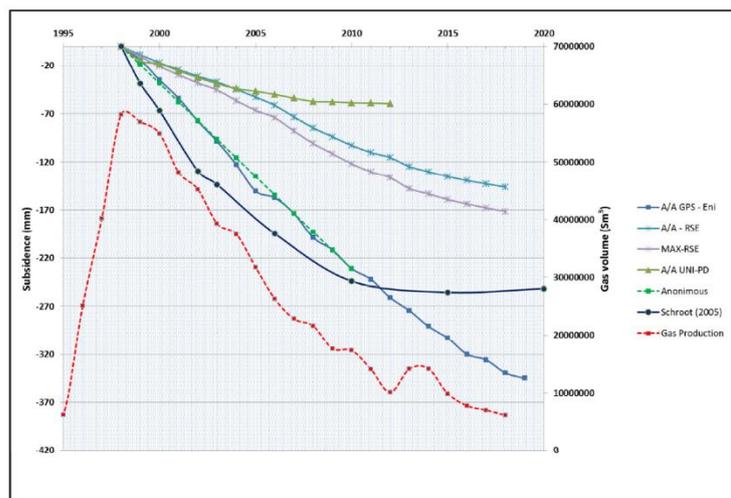


Figura L5-8 - Andamento della subsidenza antropica stimata numericamente (da RSE, UNI-PD e Schroot) e allineata con le misure sperimentali di Eni per il caposaldo piattaforma A/A

E' importante notare come il raggiungimento di questi risultati sia stato possibile grazie all'utilizzo di un significativo dataset di dati geologici e produttivi del campo - resi disponibili da Eni – grazie a cui è stato possibile realizzare:

- ✓ Un accurato modello geologico statico 3D che riproduce molto fedelmente le caratteristiche strutturali del campo e le alternanze sabbiose-argillose che caratterizzano i livelli mineralizzati a gas che si collocano ad una profondità variabile tra i 2000 e 4000 metri circa di profondità.
- ✓ Un altrettanto accurato modello dinamico 3D con una fedele riproduzione dello stato naturale al 1965 con scarti modesti nel GOIP simulato nei livelli mineralizzati.

La simulazione dinamica è stata eseguita alla scala di giacimento ed il matching sui parametri di estrazione gas, produzione acqua e pressione annuale è più che soddisfacente e onora il match di produzione con una accettabile sottostima nella produzione di acqua.

L'approccio geomeccanico applicato è stato di tipo one-way e i risultati indicano che:

- ✓ la stima numerica della subsidenza antropica è piuttosto modesta e omogeneamente distribuita fino al 1995 e aumenta sensibilmente con l'incremento della produzione di gas iniziata nel 1996 con il massimo toccato nel 1998 con un effetto sulla subsidenza totale stimabile al 10%;
- ✓ la subsidenza antropica si è mantenuta quasi costante nella fase di diminuzione della produzione gas per poi rallentare dal 2013;
- ✓ tra il 2013 e il 2018 la subsidenza antropica è diminuita sensibilmente e si nota un suo rallentamento più marcato a Fiumi Uniti (circa -50%) rispetto a A/A (circa -40%);
- ✓ il confronto delle stime numeriche con i dati GPS dei due capisaldi Eni ad Angela Angelina e Fiumi Uniti - disponibili dal 1999 al 2002 rispettivamente – indicano che la subsidenza antropica è nell'ordine del 25% della subsidenza totale rilevata a Fiumi Uniti e del 43% alla piattaforma A/A. Registrando, quindi, che i minori effetti si rinvergono sulla costa e crescono al di sotto della piattaforma fino a un massimo in mare aperto;
- ✓ l'analisi numerica mostra attualmente un evidente rallentamento della subsidenza antropica che è più marcato sempre a Fiumi Uniti.

Linea di ricerca 6 – Misure e modellazione delle deformazioni del suolo in aree interessate da attività di estrazione di idrocarburi: l'esempio dell'area costiera ravennate, nell'Alto Adriatico (INGV)

L'analisi di immagini satellitari tramite tecniche InSAR multi-temporali offre una visione sinottica di un fenomeno deformativo consentendo sia una valutazione spaziale, mediante le mappe di velocità del terreno, che temporale, grazie all'analisi delle serie temporali.

Nell'ambito di un accordo operativo tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e il Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), il Laboratorio GEOSAR dell'INGV ha effettuato uno studio, mediante l'utilizzo di dati InSAR, volto all'analisi delle deformazioni crostali nell'area costiera alto adriatica con particolare riferimento all'area di concessione per la coltivazione di idrocarburi denominata AC 27 EA, lungo la fascia ravennate.

Sono stati elaborati dati SAR Envisat, Cosmo-SkyMed e Sentinel-1 forniti dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ed Italiana (ASI) ed acquisiti in entrambe le geometrie ascendente e discendente, lungo una finestra temporale di circa 16 anni dal 2002 al 2018.

L'utilizzo congiunto di dati acquisiti lungo entrambe le orbite consente infatti di scomporre il moto acquisito lungo la linea di vista del sensore nella componente verticale ed orizzontale (Figura L6-1).

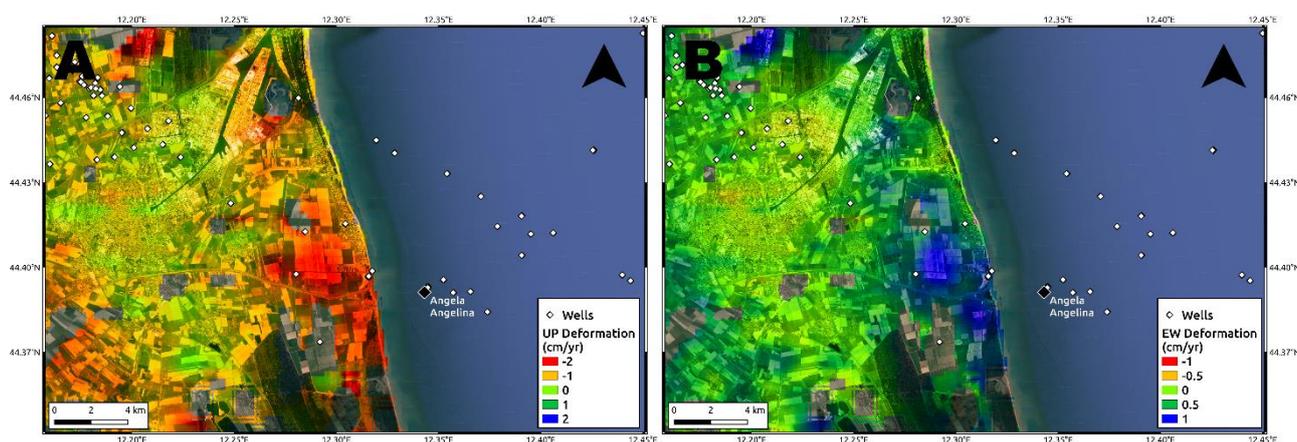


Figure L6-1 - Componente verticale (A) ed orizzontale (B) della deformazione osservata nella zona di Lido di Dante (RA)

Lo studio ha evidenziato un pattern deformazione di circa $-1|2$ cm/anno localizzato nell'area di Lido di Dante, con una componente di subsidenza ed un segnale verso ovest, dovuto a fenomeni naturali di compattazione dei terreni ed alla presenza di intensa attività antropica.

L'analisi delle serie temporali ERS, Envisat, Cosmo-SkyMed e Sentinel-1 nell'area di Lido Di Dante (Figura L6-2), mostra uno spostamento lungo la linea di vista del satellite (LoS) di circa 25 cm. Tra il 1997 ed il 1998 si osserva un aumento della subsidenza, nello stesso periodo in cui la piattaforma offshore Angela Angelina (localizzata a circa 2 km dalla costa) è entrata in funzione. Successivamente, è invece evidente un rallentamento temporale del fenomeno probabilmente connesso ad un calo della produzione della piattaforma.

L'affidabilità del dato InSAR è stata testata tramite una procedura di cross-validazione con le misure a terra fornite dalle stazioni GPS ed i benchmarck delle livellazioni presenti nell'area e di proprietà di Eni S.p.A.

I trend deformativi vincolati dalle tre tecniche risultano consistenti tra loro ed i valori di correlazione tra le differenti serie storiche si attestano intorno a 0.8-0.9, confermando quindi l'affidabilità del dato osservato.

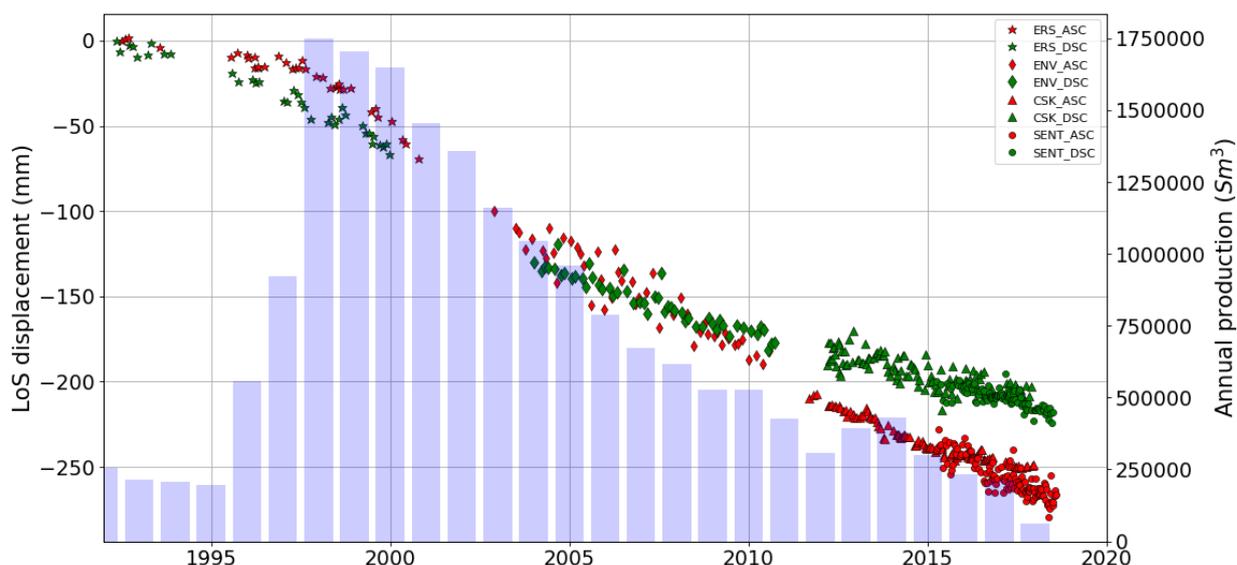
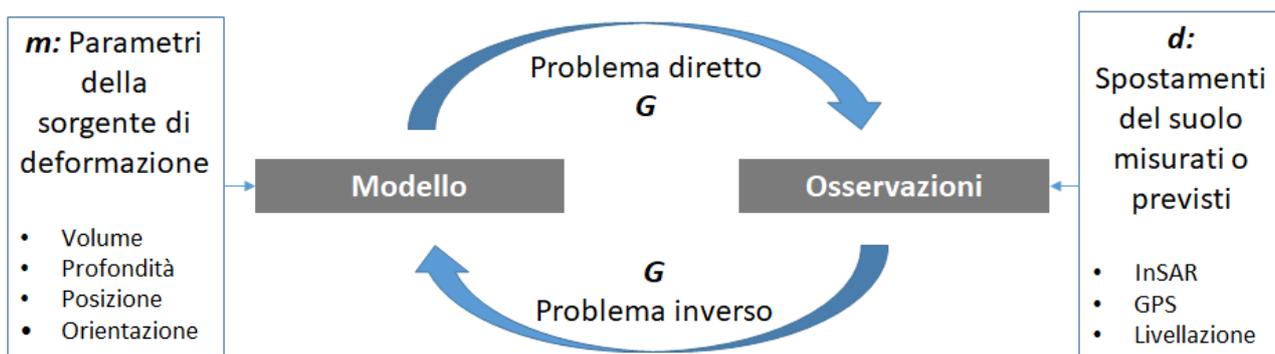


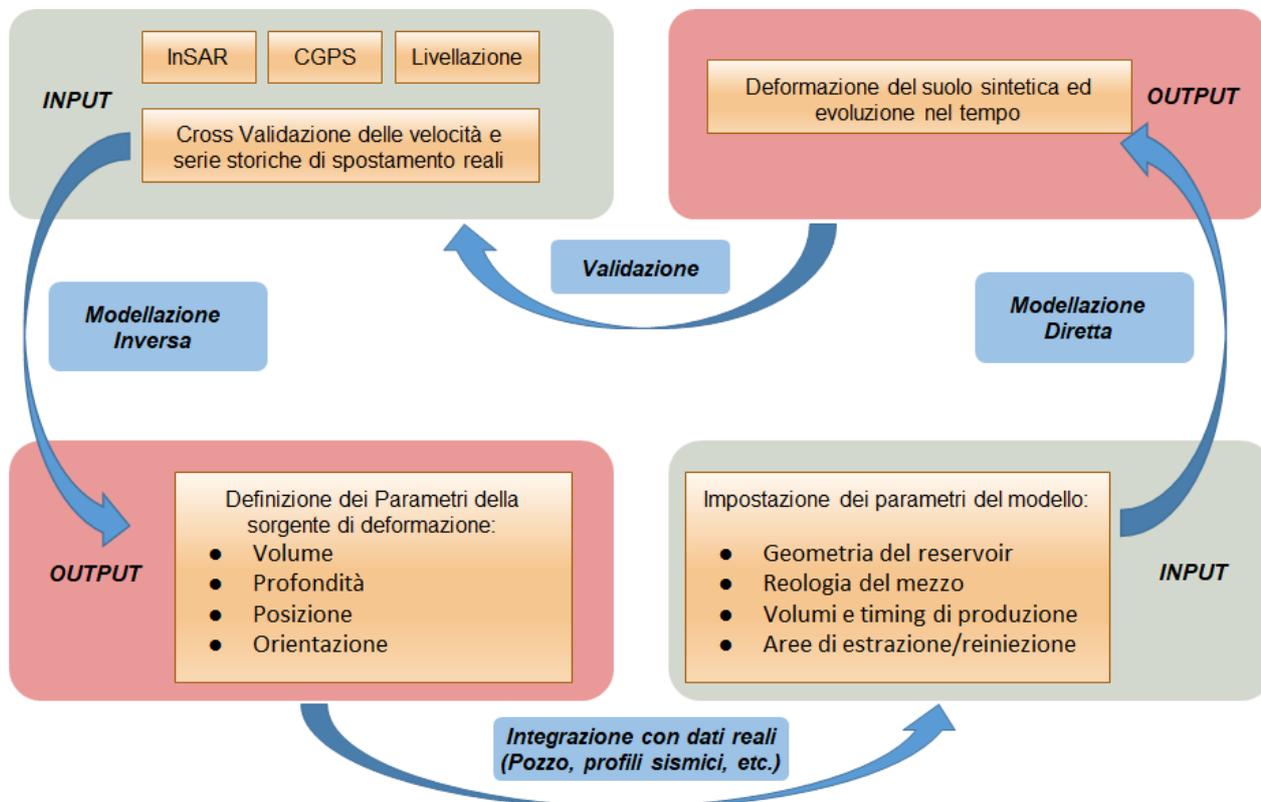
Figura L6-2 - Serie temporale dei dati InSAR lungo la LoS del satellite di un gruppo di punti nella zona di Lido Di Dante. Le barre verticali indicano la produzione annuale del campo di gas di Angela Angelina.

Con lo scopo di individuare e analizzare i processi naturali e antropici che concorrono alla subsidenza, è stata effettuata una modellazione dei dati di deformazione del suolo. L'approccio utilizzato è duplice e si basa su una modellazione inversa seguita da una modellazione diretta dei dati. La modellazione diretta (problema diretto), consiste nel calcolo degli spostamenti del suolo (osservazioni) provocati da un sorgente (modello) attraverso leggi fisiche (G). I parametri del modello (m) sono le proprietà fisiche che caratterizzano la sorgente di deformazione. La modellazione inversa consiste invece nell'individuare le proprietà fisiche del modello che meglio riproducono i dati osservati, che in questo caso, sono reali. Di seguito si riporta uno schema sintetico.



Sostanzialmente il problema diretto consiste nel calcolare le osservazioni partendo dai parametri fisici del modello; e il problema inverso consiste nell'individuare i parametri del modello, partendo dalle osservazioni reali. L'approccio seguito in questa linea di ricerca consiste quindi nel definire alcuni parametri delle sorgenti di deformazione attraverso l'inversione dei dati di deformazione del suolo. I parametri sorgente così ottenuti sono integrati e confrontati con i dati reali provenienti da altre metodologie. Lo step successivo consiste nel impostare una nuova modellazione, questa volta con un approccio di tipo diretto, e successivamente calcolare le deformazioni del suolo teoriche provocate dal modello, ovvero dalle sorgenti di deformazione. I dati teorici sono così nuovamente confrontati con i dati reali. Si realizza così un approccio ciclico-iterativo che permette di migliorare le conoscenze su tutti quei fenomeni in grado di

produrre deformazione del suolo ed in particolare, produrre subsidenza. Di seguito si riporta uno schema dell'approccio utilizzato nel progetto.



Per quanto riguarda l'inversione analitica, il reservoir è stato modellato come una dislocazione tensile e i parametri che lo caratterizzano sono stati stimati tramite l'inversione dei dati geodetici. La variazione di volume stimata tramite questo approccio mostra un andamento temporale simile a quello del cumulato degli idrocarburi estratti (Figura L6-3).

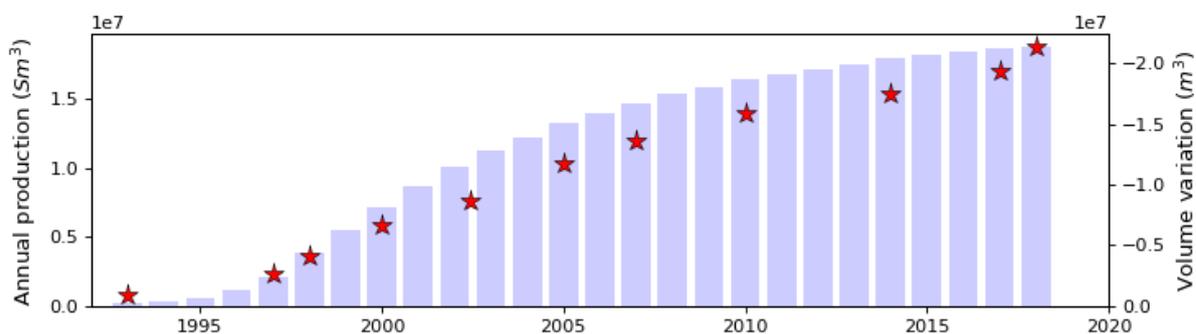


Figura L6-3 - Confronto tra la variazione di volume stimata (stelline rosse) e la produzione annuale cumulata di idrocarburi estratti (barre verticali).

Al fine di discriminare la componente antropica profonda indotta dallo sfruttamento del reservoir sulla subsidenza osservata lungo la costa tramite dati SAR, è stato realizzato un modello numerico 3D per la simulazione delle deformazioni del suolo indotte dal solo sfruttamento del reservoir tramite il software commerciale FEM Comsol Multiphysics. Il modello riportato in Figura L6-4a ha un'estensione in pianta pari a 30x30 km ed una profondità di 15 km. Il reservoir è stato posizionato ad una profondità media di 3500

metri, mentre la sua geometria è stata definita in base ad informazioni disponibili in letteratura. Il giacimento è stato modellato come una cavità vuota, la cui forma segue l'involuppo dell'insieme dei campi produttivi, ed al cui interno è applicata una distribuzione di pressioni uniforme. Nel modello inoltre è stata inserita una curva che identifica la linea di costa e due punti di misura che identificano le due stazioni GPS ANGA e FIUN posizionate rispettivamente sulla piattaforma "Angela-Angelina" e presso Lido di Dante. I materiali esterni al reservoir che rappresentano la porzione di crosta terrestre locale, hanno un comportamento elastico lineare. La deformazione del reservoir è stata simulata trascurando il comportamento poroelastico dello stesso ed applicando una pressione uniforme all'interno della geometria che simula il reservoir stesso. Tale pressione è modulata in modo da riprodurre gli spostamenti verticali registrati dal GPS ANGA nell'intervallo temporale 1998–2018. Le approssimazioni introdotte sono giustificate dal fatto che il reservoir risulta idraulicamente isolato rispetto alla roccia circostante, il cui comportamento è sostanzialmente elastico.

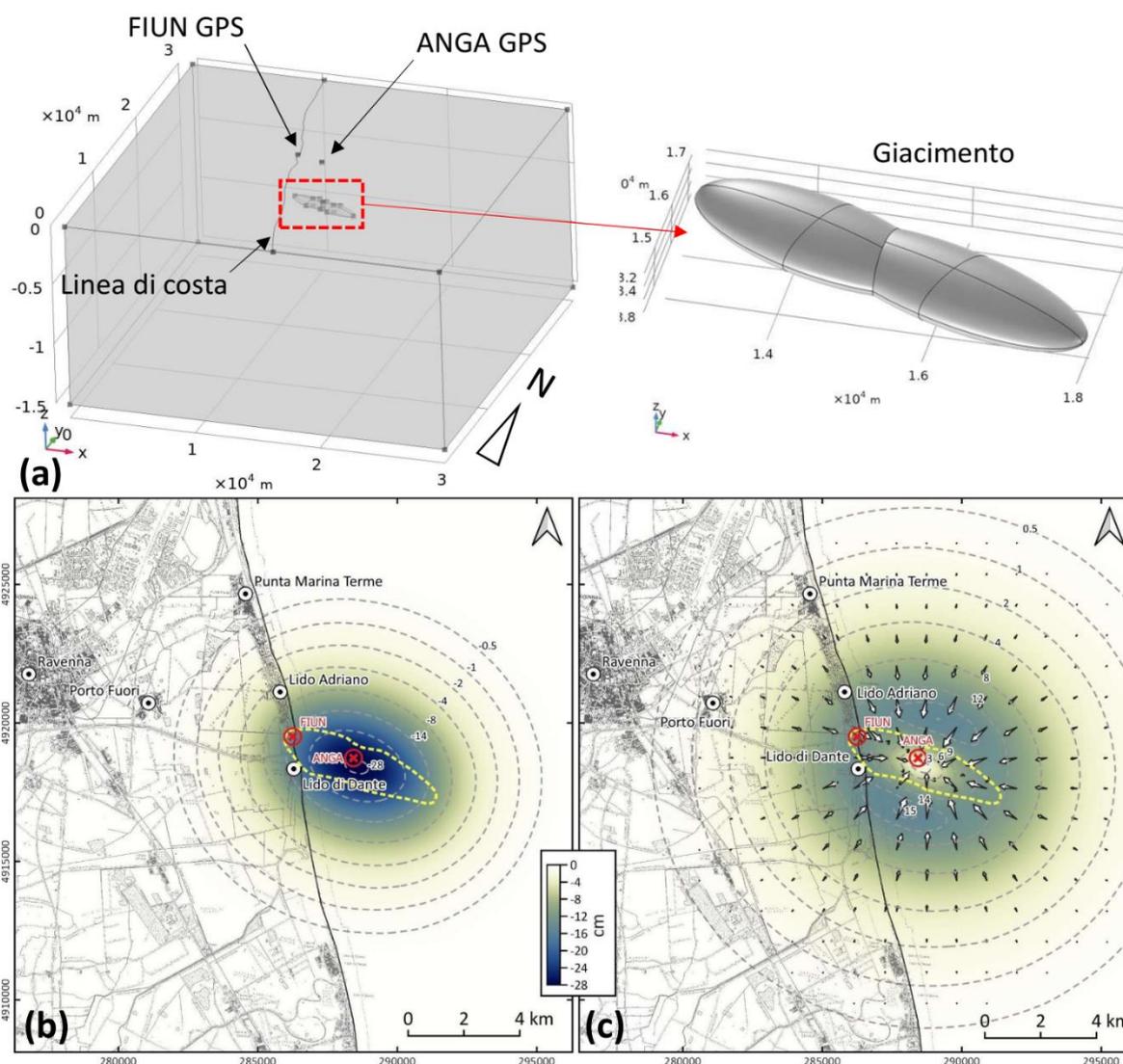


Figura L6-4 - (a) Geometria del modello numerico agli elementi finiti utilizzato per la simulazione, con dettaglio sul reservoir 3D. Risultati del modello numerico nel periodo 1998–2018. (a) Spostamenti cumulati verticali del suolo. (b) Spostamenti cumulati orizzontali del suolo.

I risultati della simulazione numerica (Figura L6-4b e L6-4c) evidenziano che gli spostamenti cumulati verticali (Figura L6-4b) ed orizzontali (Figura L6-4c) del suolo nell'intervallo temporale 1998–2018 raggiungono rispettivamente i valori massimi di 28 cm e 15–20 cm. Le misure di deformazione del GPS a terra possono essere affette da almeno tre diversi fenomeni: la compattazione naturale dei depositi, l'emungimento delle acque di falda superficiali, e l'estrazione di idrocarburi in profondità. I primi due

fenomeni provocano principalmente deformazioni verticali del piano campagna in quanto coinvolgono generalmente strati di terreno superficiali (dell'ordine delle decine o centinaia di metri di profondità) ed hanno un'elevata estensione spaziale; l'estrazione profonda di idrocarburi invece produce deformazioni al suolo sia orizzontali che verticali. Per quel che riguarda le misure a mare tra le cause di deformazioni si può escludere l'emungimento, e la compattazione dei sedimenti è da considerarsi trascurabile. In questo caso, un ruolo chiave è giocato dall'estrazione degli idrocarburi.

In questa linea di ricerca si pongono le basi quantitative per una discussione sul ruolo che giocano i diversi fattori naturali e antropici alla subsidenza, fornendo dati reali di deformazione e simulazioni matematiche.

Discussione e conclusioni

La linea di ricerca 1 ha l'obiettivo di approfondire le conoscenze geologiche e strutturali del sottosuolo italiano. Il progetto si articola in due parti mutuamente interconnesse. La prima parte consiste nella costruzione di una banca dati di natura geologica, geofisica e strutturale nonché di dati di pozzo per l'intero territorio nazionale; inoltre, relativamente alla Pianura Padana, il dataset è stato integrato anche con dati di natura petrofisica. Sulla base di tutte queste informazioni, si è proceduto alla realizzazione di un modello geologico 3D del sottosuolo atto a riprodurre le principali caratteristiche geologiche della Pianura Padana e dell'Adriatico settentrionale comprensivo delle zone di studio. Tale modello verrà integrato successivamente con le proprietà meccaniche delle unità geologiche ricostruite attraverso i dati estrapolati dai pozzi. Il modello regionale costituisce il punto di partenza per future analisi sismologiche e per simulare il comportamento del flusso dei fluidi nel sottosuolo e le variazioni deformative ad esso associate, nell'ottica di valutare l'impatto e la sicurezza delle attività antropiche.

I risultati ottenuti dalla linea di ricerca 1 hanno consentito al gruppo di lavoro della linea di ricerca 2, attraverso l'integrazione dell'interpretazione dei profili sismici a riflessione con i dati CGPS, di definire una zona tettonicamente attiva orientata NW-SE e larga circa 30 km dove le deformazioni osservate variano con una velocità da 1.5 a 2.5 mm/anno. Tra le nuove informazioni apportate dallo studio in tale area vi è la discriminazione del tasso di deformazione dovuto alla componente tettonica stimato grazie anche alla grande quantità di dati CGPS forniti dall'operatore ENI.

Il metodo utilizzato ha evidenziato l'efficacia dell'utilizzo integrato di dati geodetici, seppur affetti da un disturbo antropico, con l'analisi di dati geologici di sottosuolo anche in aree dove altre metodologie d'indagine non sono applicabili.

La linea di ricerca 3 ha permesso di valutare la deformazione del suolo dell'area in esame attraverso l'analisi di dati satellitari. In particolare sono stati osservati alcuni fenomeni molto localizzati che interessano principalmente l'area costiera che va da Lido Adriano a Lido di Dante e la zona portuale di Ravenna. I plot delle serie temporali di deformazione hanno rilevato la presenza di un fenomeno di deformazione che è caratterizzato da un tasso che aumenta da Nord (Lido Adriano) a Sud (Lido Dante), raggiungendo valori di circa -1 cm/anno. Inoltre in corrispondenza delle piattaforme offshore gli stessi fenomeni raggiungono tassi di deformazione che superano valori di -1 cm/anno. Tali valori sono mediamente coerenti con i risultati ottenuti dalle analisi effettuate nell'ambito della linea di ricerca 4 che ha condotto ad una verifica di coerenza del dataset GPS di Eni attraverso il confronto e la validazione di diverse metodologie di analisi e di diverse catene di processamento dati.

In base ai risultati ottenuti si nota una velocità maggiore verso l'offshore. Tale trend è risultato anche dalle attività condotte nell'ambito della linea di ricerca 5. Infatti gli obiettivi di questa linea di ricerca riguardano la valutazione degli effetti dell'estrazione di acqua sulla subsidenza nelle aree onshore e la valutazione degli effetti dell'estrazione di gas sulla linea di costa e nelle aree offshore. Dai risultati si evidenzia che il contributo dell'estrazione di acqua alla deformazione nell'area al nord di Ravenna (zona di Comacchio) è passato nel periodo 2000 - 2017 dal 79% al 38% (Antoncecchi et al. 2020) in linea anche con i dati sui volumi di acqua estratti, forniti dalla Regione Emilia-Romagna. Tali valori registrano probabilmente un effetto ritardato rispetto alle politiche di riduzione di estrazione di acqua messe in atto dalla Regione Emilia-Romagna dovute alla lenta compattazione degli acquiferi. I risultati del progetto hanno messo in evidenza un contributo dell'estrazione di gas nella concessione scelta come caso studio alla subsidenza totale del 25 %. Tale contributo dalla zona di Fiumi Uniti (linea di costa) aumenta verso mare, nelle zone dove avviene il prelievo di gas. Tuttavia questo trend è attualmente in diminuzione considerando il decremento della produzione di gas dovuto alla fase finale di coltivazione del giacimento.

Lo studio condotto dalla linea di ricerca 5 evidenzia i vantaggi di un approccio multidisciplinare per studiare il processo di subsidenza in atto nell'area di studio, e che tipicamente interessa la Regione Emilia-Romagna. I risultati presentati portano nuove conoscenze sul contributo del prelievo di acque sotterranee alla subsidenza totale nell'area di studio.

Il valore dell'approccio multidisciplinare risulta rafforzato anche dai risultati ottenuti dalla linea di ricerca 6 che ha portato ad individuare, seppur in modo preliminare, procedure di confronto fra le diverse tecniche

di monitoraggio e metodologie per individuare in maniera rapida contesti da approfondire con ulteriori analisi.

Gli approcci considerati necessitano di ulteriori indagini attraverso ricerche future che sfruttino un adeguato set di dati satellitari, geologici e di produzione con continuità sia spaziale che temporale per la definizione di best practice e/o Indirizzi e Linee Guida da applicare al monitoraggio della subsidenza offshore o per integrare le Linee Guida già esistenti per l'onshore.

In generale il progetto ha dimostrato la validità dell'approccio multidisciplinare per raggiungere il più alto grado di conoscenze sulla deformazione del suolo. Infatti, i risultati raggiunti sono di rilievo, avendo anche prodotto diverse pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.

Le informazioni ottenute rappresentano una base di conoscenze necessaria per le amministrazioni, per gli enti di ricerca che vi hanno lavorato e per gli enti territoriali, acquisita grazie al programma CLYPEA, ma trattandosi di un percorso scientificamente lungo e difficile è necessario sviluppare ulteriori obiettivi di ricerca.

Bibliografia

Aagaard, B. T., Knepley, M. G., e Williams, C. A., (2013). A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite element models of quasi statics and dynamic crustal deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, n. DOI: 10.1002/jgrb.50217.

Aagaard, B.T., Knepley, M. G., e Williams, C. A. (2017). PyLith - User Manual, Version 2.2.1. Davis, C.A.: Computational Infrastructure of Geodynamics, URL: geodynamics.org/cig/software/github/pylith-2.2.1_manual.pdf.

Aagaard, B.T., Knepley, M. G., e Williams, C. A. (2017). PyLith - Version 2.2.1. Davis, CA: Computational Infrastructure of Geodynamics, n. DOI: 10.5281/zenodo.886600, 2017.

Agate G. e Guandalini R., (2018). Manuale d'uso del software GeoSIAM - versione 2.0. RSE S.p.A., Milano.

Anderlini, L., Serpelloni, E., Tolomei, C., De Martini, P. M., Pezzo, G., Gualandi, A., & Spada, G. (2020). New insights into active tectonics and seismogenic potential of the Italian Southern Alps from vertical geodetic velocities. *Solid Earth*, 11(5), 1681-1698.

Antoncecchi, I., Ciccone, F., Rossi, G., Agate, G., Colucci, F., Moia, F., Manzo, M., Lanari, R., Bonano, M., De Luca, C., Calabrese, L., Perini, L., Severi, P., Pezzo, G., Macini, P., Benetatos, C., Rocca, V., Carminati, E., Billi, A., Petracchini, L., (2021). Soil deformation analysis through fluid-dynamic modelling and DInSAR measurements: a focus on groundwater withdrawal in the Ravenna area (Italy). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, BGTA*, Vol.62, n.2, June 2021, pp.3101-318. DOI 10.4430/bgta0350

Argnani, A. (1998). Structural elements of the Adriatic foreland and their relationships with the front of the Apennine fold-and-thrust belt. *Memorie Società Geologica Italiana* 52, 647–654

AA.VV., «Petrel: the platform for E&P decision making,» Schlumberger Ltd, 2016. Disponibile al link: <http://www.slb.com>.

Bally, A. W. (1986). Balanced sections and seismic reflection profiles across the Central Apennines. *Memorie Società Geologica Italiana*, 35, 257-310.

Basili, R. & Barba S., (2007). Migration and shortening rates in the northern Apennines, Italy: implications for seismic hazard. *Terra Nova* 19.6, 462-468.

Bennett, R. A., Serpelloni, E., Hreinsdóttir, S., Brandon, M. T., Buble, G., Basic, T., Casale, G., Cavaliere, A., Anzidei, M., Marjonovic, M., Minelli, G., Molli, G., & Montanari A. (2012), Syn-convergent extension observed using the RETREAT GPS network, northern Apennines, Italy, *Journal of Geophysical Research*, 117, B04408, doi:10.1029/2011JB008744.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., (2002). A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 40, pp. 2375-2383.

Bigi G., Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V. & Vai G.B., (1990b). Structural Model of Italy scale 1:500.000, sheet 2. C.N.R., Progetto Finalizzato Geodinamica, SELCA Firenze.

Bigi G., Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P. & Vai G.B., 1990a - Structural Model of Italy scale 1:500.000, sheet 1. C.N.R., Progetto Finalizzato Geodinamica, SELCA Firenze.

Bigi, G., Bonardi, G., Catalano, R., Cosentino, D., Lentini, F., Parotto, M., Turco, E., (1992). Structural model of Italy: Progetto Finalizzato Geodinamica. CNR-IGNDT, Rome, scale, 1.

Bird, P., C. Kreemer, & Holt, W. E. (2010). A long-term forecast of shallow seismicity based on the global strain rate map, *Seismological Research Letters*, 81(2), 184–194, doi:10.1785/gssrl.81.2.184.

Bird, P., Jackson, D.D., Kagan, Y. Y., Kreemer, C., & Stein R. S. (2015). GEAR1: A Global Earthquake Activity Rate model constructed from geodetic strain rates and smoothed seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 2538-2554, doi: 10.1785/0120150058.

Bonano, M., Manunta, M., Marsella, M., Lanari, R., (2012). Long Term ERS/ENVISAT Deformation Time-Series Generation at Full Spatial Resolution via the Extended SBAS Technique, *Int. J. Remote Sens.*, 33, 15, pp. 4756-4783.

Burgmann, R., Rosen, P.A. Fielding, E.J., (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 28, pp. 169–209.

Cassano E., Anelli A., Fichera R., Cappelli V., (1986). Pianura Padana: interpretazione integrata di dati geologici e geofisici. *Atti del 73° Congresso della Società Geologica Italiana*, 29 settembre – 4 ottobre, 1986, Roma.

Casu, F., Elefante, S., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C., Lanari, R., (2014). SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation, *IEEE J Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7(8), pp. 3285–3296.

Casu, F., Manzo, M., Lanari, R., (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sens Environ* 102 (3–4), pp. 195–210.

Coppi, O., Grandi, S., Urtis, R. (2017). UNMIG 1957-2017 - 60° dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse. CRIET, Milano, pp 133-137.

Coward, M. P., De Donatis, M., Mazzoli, S., Paltrinieri, W., & Wezel, F. C. (1999). Frontal part of the northern Apennines fold and thrust belt in the Romagna-Marche area (Italy): Shallow and deep structural styles. *Tectonics*, 18(3), 559-574.

D'Agostino, N. (2014), Complete seismic release of tectonic strain and earthquake recurrence in the Apennines (Italy). *Geophysical Research Letters*, 41, 1155–1162, doi: 10.1002/2014GL059230.

Devoti, R., D'Agostino, N., Serpelloni, E., Pietrantonio, G., Riguzzi, F., Avallone, A., Cavaliere, A., Cheloni, D., Cecere, G., D'Ambrosio, C., Falco, L., Selvaggi, G., Métois, M., Esposito, A., Sepe, V., Galvani, A., Anzidei, M. (2017) The mediterranean crustal motion map compiled at INGV. *Ann Geophys.* 60, 2, S0215, doi:10.4401/ag-7059.

Devoti, R., Riguzzi, F., Cuffaro, M., & Doglioni, C. (2008). New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2), 163-174.

Di Bucci, D., & Mazzoli, S. (2002). Active tectonics of the Northern Apennines and Adria geodynamics: new data and a discussion. *Journal of Geodynamics*, 34(5), 687-707.

DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

- Doglioni, C., Barba, S., Carminati, E., & Riguzzi, F. (2015). Fault on-off versus strain rate and earthquakes energy. *Geoscience Frontiers*, 6(2), 265-276.
- Fantoni, R., & Franciosi, R. (2009). Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti online Società Geologica Italiana*, 9, 28-31.
- Fantoni, R., Franciosi, R. (2009). Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti online Società Geologica Italiana*, 9, 28-31.
- Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system. *Nature*, 441(7096), 968-971.
- Finetti, I., & Del Ben R. (2005). Crustal tectono-stratigraphic setting of the Adriatic Sea from new crop seismic data. In: Finetti, I. (Ed.), *CROP Project, Deep Seismic Exploration of the Central Mediterranean Region and Italy*. Elsevier, 519–548.
- Franciosi, R., & Vignolo, A. (2002). Northern Adriatic Foreland-a Promising Setting for the Southalpine Midtriassic Petroleum System. In *64th EAGE Conference & Exhibition*.
- Frepoli, A., Amato, A. (2000). Spatial variation in stresses in peninsular Italy and Sicily from background seismicity. *Tectonophysics* 317, 1-2, 109-124.
- Galluzzo, F., & Santantonio, M. (2002). The Sabina Plateau: a new element in the Mesozoic palaeogeography of Central Apennines. *Tectonic Studies Group Meeting, 1997. Bollettino della Società Geologica Italiana Special Volume 1*, 561-588.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential interferometry. *J Geophys Res* 94 (B7), pp. 9183–9191.
- Geuzaine, C., Remacle, J. (2010). GMSH: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in pre- and post-Processing Facilities. Version 2.5.0. <http://geuz.org/gmsh/>.
- Gualandi, A., Nichele, C., Serpelloni, E., Chiaraluce, L., Anderlini, L., Latorre, D., Belardinelli, M. E., & Avouac J.-P. (2017). Aseismic deformation associated with an earthquake swarm in the northern Apennines (Italy), *Geophysical Research Letters*, 44, 7706–7714, doi: 10.1002/2017GL073687.
- Hammond, W.C., Blewitt, G., & Kreemer, C. (2016), GPS Imaging of vertical land motion in California and Nevada: Implications for Sierra Nevada uplift, *Journal of Geophysical Research*, 121, doi: 10.1002/2016JB013458
- Kastelic, V., Vannoli, P., Burrato, P., Fracassi, U., Tiberti, M. M., & Valensise, G. (2013). Seismogenic sources in the Adriatic Domain. *Marine and Petroleum Geology*, 42, 191-213.
- Kreemer, C., Blewitt, G., & E. Klein, C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model, *Geochem. Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3849–3889, doi:10.1002/2014GC005407.
- Lanari, R., Bonano, Casu, F., De Luca, C., Manunta, M., Manzo, M., Onorato, G., Zinno, I., (2020). Automatic Generation of Sentinel-1 Continental Scale DInSAR Deformation Time Series through an Extended P-SBAS Processing Pipeline in a Cloud Computing Environment, *Remote Sens.*, , 12, 2961; doi:10.3390/rs1218296.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Lundgren, P., (2007). Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California, *Remote Sens. Environ.* 109, (1) , pp. 20-28.

Livani, M., Scrocca, D., Arecco, P., & Doglioni, C., (2018). Structural and stratigraphic control on salient and recess development along a thrust belt front: The Northern Apennines (Po Plain, Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123.

Manunta, M., De Luca, C., Zinno, I., Casu, F., Manzo, M., Bonano, M., Fusco, A., Pepe, A., Onorato, G., Berardino, P., De Martino, P., Lanari, R., (2019). The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 9, pp. 6259-6281, doi: 10.1109/TGRS.2019.2904912

Massonnet, D., and Feigl, KL. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev Geophys.*, 36, pp. 441–500.

Montone, P., & Mariucci, M. T. (2015). P-wave velocity, density, and vertical stress magnitude along the crustal Po Plain (Northern Italy) from sonic log drilling data. *Pure and Applied Geophysics*, 172(6), 1547-1561.

Montone, P., Mariucci, M. T., and Pierdominici, S. (2012). The Italian present-day stress map, *Geophys. J. Int.*, 189, 705–716.

Palano, M., Pezzo, G., Serpelloni, E., Devoti, R., D'Agostino, N., Gandolfi, S., Sparacino, F., Anderlini, L., Poluzzi, L., Tavasci, L., Macini, P., Pietrantonio, G., Riguzzi, F., Antoncicchi, I., Ciccone, F., Rossi, G., Avallone, A., & Selvaggi, G. (2020). Geopositioning time series from offshore platforms in the Adriatic Sea. *Sci. Data* 7, 373, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00705-w>.

Palano, M., Pezzo, G., Serpelloni, E., Devoti, R., D'Agostino, N., Gandolfi, S., Sparacino, F., Anderlini, L., Poluzzi, L., Tavasci, L., Macini, P., Pietrantonio, G., Riguzzi, F., Antoncicchi, I., Ciccone, F., Rossi, G., Avallone, A., Selvaggi, G. (2020). Geopositioning time series from offshore platforms in the Adriatic Sea. *PANGAEA*, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.914358>.

Pepe, A., Sansosti, E., Berardino, P., Lanari, R., (2005). On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2, 3, , pp. 265–269.

Pepe, A., Yang, Y., Manzo, M., Lanari, R., (2015). Improved EMCF-SBAS Processing Chain Based on Advanced Techniques for the Noise-Filtering and Selection of Small Baseline Multi-Look DInSAR Interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 8, , doi: 10.1109/TGRS.2015.2396875.

Pezzo, G., Petracchini, L., Devoti, R., Maffucci, R., Anderlini, L., Antoncicchi, I., Billi, A., Carminati, E., Ciccone, F., Cuffaro, M., Livani, M., Palano, M., Petricca P., Pietrantonio, G., Riguzzi, F., Rossi, G., Sparacino, F., Doglioni, C. (2020). Active fold-thrust belt to foreland transition in northern Adria, Italy, tracked by seismic reflection profiles and GPS offshore data. *Tectonics*, 39, e2020TC006425.

Pezzo, G., Tolomei, C., Atzori, S., Salvi, S., Shabanian, E., Bellier, O., & Farbod, Y. (2012). New kinematic constraints of the western Doruneh fault, northeastern Iran, from interseismic deformation analysis. *Geophysical Journal International*, 190(1), 622-628.

Ponraj, M., Amirtharaj, S., Sunil, P. S., Saji, A. P., Kumar, K. V., Arora, S. K., Reddy, C.D., & Begum, S. K. (2019). An assessment of present-day crustal deformation in the Kumaun Himalaya from GPS observations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 176, 274-280.

Rebischung, P. (2012). [IGSMail-6663] IGB08: an update on IGS08 <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000497.html>.

- Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J. & Garayt, B. (2016). The IGS contribution to ITRF2014. *J. Geod.* 90, 611–630. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6>.
- Riguzzi, F., Crespi, M., Devoti, R., Doglioni, C., Pietrantonio, G., & Pisani, A. R. (2012). Geodetic strain rate and earthquake size: new clues for seismic hazard studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 206, 67-75.
- Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini, P. (2020). The Italian earthquake catalogue CPT15. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>
- Serpelloni, E., Faccenna, C., Spada, G., Dong, D. & Williams, S. D. (2013). Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *J. Geophys. Res.* 118(11), 6003–6024. <https://doi.org/10.1002/2013JB010102>.
- Toda, S., Stein, R.S., Sevilgen, V., & Lin, J., (2011). Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching – User guide. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2011-1060, pp. 63, Available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>.
- Vannoli, P., Basili, R., Valensise, G. (2004). New geomorphic evidence for anticlinal growth driven by blind-thrust faulting along the northern Marche coastal belt (central Italy). *Journal of Seismology*, 8(3), 297-312.
- Voronoi, M. (1908). Nouvelles Applications des Parametres Continus a la Theorie des Formes Quadratiques – *J. Reine Angew. Math.* 134, pp. 198-287.
- Wrigley, R., Hodgson, N., Esestine, P. (2015). Petroleum geology and hydrocarbon potential of the Adriatic basin, offshore Croatia: *Journal of Petroleum Geology*, 38, 301–316, doi: 10.1111/jpg.12612.
- Zebker, HA, Villasenor, J., (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, pp. 950–959.