



## Campo di BARBARA NW

Aggiornamento al 31/12/2017

Il campo di Barbara NW è situato nell'offshore Adriatico circa 55 km a NE di Ancona, a una profondità d'acqua di circa 70 m, nella concessione A.C7.AS evidenziata in Figura 1.

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C7.AS	12/11/19	Eni	Eni	100%	Marche

Il giacimento è costituito da una blanda anticlinale asimmetrica orientata in direzione NW-SE, che si estende per circa 10 km<sup>2</sup>. La serie mineralizzata è compresa tra i 1000 e 1300 m slm e interessa i livelli della serie PLQ rappresentata dal Gruppo Asti, F.ne Carola (Figura 2). Il campo di Barbara NW è stato scoperto nel 1971 con il pozzo Barbara NW 1. Il ritrovamento è stato poi confermato nel periodo 1979÷1991 dalla perforazione dei pozzi Barbara NW 2 e 3. Nel 1992 è stato perforato il pozzo Barbara NW 4 risultato sterile. Nell'ottobre 1997 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente la realizzazione della piattaforma Barbara NW con la perforazione di 4 pozzi e la posa del relativo sealine di collegamento.

Nel documento SIA si riportava un profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse* 3D) del settembre 1995. Tale profilo prevedeva il recupero di 2100 MSm<sup>3</sup> di riserve in 18 anni con un picco di produzione giornaliera di 800 kSm<sup>3</sup>/g. La subsidenza massima, prevista in relazione a tale profilo e valutata con un modello geomeccanico Geertsma cilindrico, è risultata pari a 18,6 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 20 anni dall'inizio della produzione; alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) era stimato estendersi per circa 3 km verso la costa. Per tale previsione si erano utilizzati i parametri geomeccanici che, con le informazioni disponibili a tale data, venivano considerati come più rappresentativi del comportamento della formazione, in particolare:

- compressibilità uniassiale  $C_m = 0.612 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ ;
- coefficiente di Poisson  $\nu = 0.33$ .



In seguito al Decreto VIA n° 3477 del 15/12/98 che approvava il programma lavori presentato, nel 1999 si è sviluppato campo con la perforazione dei 4 nuovi pozzi Barbara NW 5, 6, 7 e 8 da una piattaforma di tipo BEAF.

La piattaforma Barbara NW è entrata in produzione nel settembre del 1999 con una portata iniziale di circa 700 kSm<sup>3</sup>/g.

Il comportamento produttivo del campo durante i primi 5 anni è risultato, però, inferiore alle attese a causa dell'arrivo prematuro dell'acqua di formazione, il che ha reso necessaria una revisione dello studio statico e dinamico di giacimento.

Tale revisione, fatta nel maggio 2007, ha dato come risultati:

- 1) riduzione dell'11% del GOIP totale (*GOIP studio statico settembre 1995 pari a 3370 MSm<sup>3</sup>, GOIP revisione studio statico del maggio 2007 pari a 2983 MSm<sup>3</sup>*);
- 2) riduzione del 49% delle riserve a vita intera del campo sia per effetto del calo del GOIP, sia, soprattutto, per una migliore taratura del contributo dell'acquifero che ha penalizzato il recupero finale di gas. Il nuovo profilo di produzione prevede, infatti, il recupero di 1080 MSm<sup>3</sup> entro il 2024 con graduale chiusura dei pozzi dovuta all'alta percentuale d'acqua prodotta.

Sulla base dei risultati dello studio di giacimento del maggio 2007 sono state a loro volta aggiornate le previsioni di subsidenza. A tale scopo si è utilizzato un modello geomeccanico del tipo Geertsma semianalitico con una legge costitutiva di tipo elasto-plastico *CCM (Cam Clay Modificato)* per la roccia serbatoio del giacimento e degli acquiferi idraulicamente connessi. La calibrazione di tale legge costitutiva è stata fatta con i valori compressibilità uniasiale  $C_m$  derivati dalle misure di compattazione in situ eseguite sino al giugno 2003 nei pozzi attrezzati con *marker* dei campi a gas del Nord Adriatico [*Hueckel et al.*<sup>1</sup>].

Dalle simulazioni con modello geomeccanico si è ottenuta una previsione di subsidenza massima di 15,5 cm dopo circa 10 anni dall'inizio produzione e un'estensione massima del cono di subsidenza di circa 12 km verso la costa, che è raggiunta al termine della vita produttiva del campo. La distanza minima della linea d'iso-subsidenza di 2 cm dalla costa è risultata, quindi, pari a 43 km.

---

<sup>1</sup> T. Hueckel, G. Cassiani, J. H. Prévost, and D. A. Walters, Field derived compressibility of deep sediments of the northern Adriatic, in Land Subsidence – Special Volume, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Symp. on Land Subsidence, P. R. China, 23-28 Oct. 2005.



Nel corso del 2010, a seguito della presentazione dell'istanza di sviluppo per il vicino campo di Fauzia, si sono di nuovo aggiornati sia il modello di giacimento, sia quello geomeccanico al fine di valutare la possibile subsidenza indotta dalla coltivazione dei due giacimenti, tenendo conto dei possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica fra gli stessi (la struttura di Fauzia dista da quella di Barbara NW circa 10 km in direzione SW).

La previsione di subsidenza è stata fatta con un modello a elementi finiti (FEM) utilizzando il codice di calcolo Abaqus e considerando diversi scenari di pressione e compressibilità (*rel. Eni-TERA: Campi di Barbara NW e Fauzia – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary – agosto 2010*).

Per lo scenario di riferimento, ritenuto il più probabile, la subsidenza massima prevista è stata pari a 31 cm dopo circa 10 anni (al 2022); il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) a sua volta è risultato estendersi al massimo per 14 km verso la costa al termine della vita produttiva e fino a fine simulazione, esaurendosi a circa 41-42 km dalla linea di costa.

In base alle prime indicazioni ottenute dall'ultima revisione dello studio di giacimento (*rel. GIAC/CS n° 77-09 del 10/2009*), si sono pianificati nel 2010 alcuni interventi finalizzati a migliorare la produzione e il recupero di gas dal giacimento stesso. Il relativo programma operativo prevedeva sia l'esecuzione di un *side-track* del pozzo Barbara NW 8 dir, sia la perforazione di due nuovi pozzi da "slot" ancora disponibili sulla piattaforma di Barbara NW (Barbara NW 9 dir e Barbara NW 10 dir).

In seguito ai risultati positivi ottenuti con l'esecuzione dei tre pozzi di progetto e in considerazione del notevole interesse minerario dei livelli sottili profondi mineralizzati a gas, si è modificato il programma iniziale perforando nel settore orientale del campo altri due *side-track*: Barbara NW 7 dirB e Barbara NW 6 dirA.

L'intervento sulla piattaforma Barbara NW è terminato nel dicembre 2011.

Le nuove informazioni sul giacimento acquisite con gli interventi sopra menzionati e le migliori performance del campo hanno, inoltre, portato a un'ulteriore revisione/aggiornamento dello studio di giacimento, sia statico che dinamico (*rel. GISE 33/12 - Campo di Barbara NW - Studio di giacimento - dicembre 2012*) che ha prodotto i seguenti risultati:



1. rivalutazione del GOIP dei livelli sviluppati del campo pari al 175% (*GOIP studio statico maggio 2007 pari a 2983 MSm<sup>3</sup>, GOIP revisione studio statico del dicembre 2012 pari a 8200 MSm<sup>3</sup>*);
2. conseguente incremento del 142% delle riserve a vita intera del campo. Il nuovo profilo di produzione prevede, infatti, il recupero di 2646 MSm<sup>3</sup> entro il 2029 con graduale chiusura dei pozzi dovuta all'alta percentuale d'acqua prodotta.

Sulla base dei risultati dello studio di giacimento sono state riviste le previsioni di subsidenza considerando ancora i possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica tra il campo di Barbara NW e quello di Fauzia (*rel. Eni-TERA n° 04-13 dell'aprile 2013*).

Nel corso del 2016 è stato nuovamente aggiornato il modello di giacimento (*rel. GISE 04/16- Nota tecnica per proposta 2ST- febbraio 2016*) per valutare la fattibilità di un intervento di W.O. che prevedeva la perforazione di 2 *side-track* con cui incrementare a 2795 MSm<sup>3</sup> le riserve a vita intera del campo.

La perforazione del primo *side-track* (BNW 5dirB) è iniziata nel dicembre 2017; il secondo (BNW 9dirA) sarà eseguito nel 2018.

Nel 2017 un ultimo aggiornamento del modello di giacimento (Figure 3a e 3b) ha stimato le riserve a vita intera del campo in 2737 MSm<sup>3</sup> (*Campo di Barbara NW- relazione Eni-GISE 09/2017- Aggiornamento studio di giacimento per studio geomeccanico - Scheda Riassuntiva - settembre 2017*) in calo, quindi, rispetto al valore precedente di 2795 MSm<sup>3</sup> ottenuto con lo studio del 2016.

In Figura 4 sono riportati gli andamenti storici della portata di gas (kSm<sup>3</sup>/g), d'acqua (m<sup>3</sup>/g) e della produzione cumulativa di gas al 31/12/17 pari a 2015 MSm<sup>3</sup>.

La Figura 5 presenta, invece, il confronto tra il profilo di pressione calcolato dal modello *Eclipse* del settembre 2017 e le pressioni statiche misurate per i livelli più rappresentativi del campo (i.e. PLQ-B+C1 e PLQ-C1+C2); confronto che mostra come le previsioni sull'andamento futuro della pressione di giacimento si possano ritenere conservative.

Sulla base dei risultati di quest'ultimo studio di giacimento sono state anche aggiornate le previsioni di subsidenza, per le quali si è sempre tenuto conto dei possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica tra i campi di Barbara NW e di Fauzia (*Campi di Barba-*



*ra NW e Fauzia – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary – Relazione Eni-REIT 04/2017 del dicembre 2017).*

Nel fare questo aggiornamento si sono considerati due possibili scenari produttivi:

- caso DN: Barbara NW, caso “Do Nothing” e Fauzia, caso “Do Nothing”;
- “SVIL ”:Barbara NW, caso “DN e 2 *side-track* (BNW9dirA e BNW5dirB)” e Fauzia, caso “DN con stimolazione acida del pozzo Fauzia 3 dir e apertura completamenti esclusi string lunga di Fauzia 2 ”.

Si è, inoltre, tenuto conto delle incertezze nella stima delle proprietà geomeccaniche della roccia serbatoio, assumendo per queste ultime due diverse leggi di variazione della comprimibilità uniassiale in funzione dello sforzo efficace (scenari “MNO2” e “M2”).

In totale, quindi, si sono esaminati con il modello geomeccanico quattro possibili scenari :

- “DN\_MNO2”: scenario di produzione DN e scenario di comprimibilità MNO2;
- “SVIL\_MNO2”: scenario di produzione SVIL e scenario di comprimibilità MNO2;
- “DN\_M2”: scenario di produzione DN e scenario di comprimibilità M2;
- “SVIL\_M2”: scenario di produzione SVIL e scenario di comprimibilità M2.

Tutte le previsioni sono state protrate fino al 2068 onde considerare l’effetto dell’evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero anche dopo la fine della produzione (anno 2018). Le previsioni di massima subsidenza ed estensione del relativo cono sono riportate nella Tabella 1 per i due scenari di compressibilità e per quattro momenti, scelti durante e dopo la vita produttiva di entrambi i campi.

I principali risultati della nuova previsione sono pertanto relativi ai seguenti casi:

- SVIL\_MNO2 (scenario di produzione SVIL e scenario di comprimibilità MNO2)
- SVIL\_M2 (scenario di produzione SVIL e scenario di comprimibilità M2)

**Tabella 1: massima subsidenza ed estensione del fenomeno per i due scenari “SVIL”**

	1-gen-2017		1-gen-2029		1-gen-2038		1-gen-2068	
	Max sub (cm)	Max estensione (km)						
SVIL_MNO2	34	7	44	12	44	12	41	13
SVIL_M2	57	7	73	12	71	12	67	13

Si noti come in tutti i casi esaminati il cono di subsidenza si esaurisca sempre a una distanza di circa 42 km dalla linea di costa (Figura 6 e Figura 7).

A partire dai primi anni '70, Eni ha progettato e realizzato lungo la costa adriatica una rete di livellazione geometrica che, su richiesta degli Enti di Controllo a livello regionale e nazionale (Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna e Ministero dell'Ambiente), è rilevata con cadenza periodica. A partire dalla campagna 2011, dopo un intervallo di un anno nel 2010 (anno in cui non sono state fatte livellazioni), tale periodicità ha una cadenza triennale come raccomandato nelle *“Linee Guida per lo Studio del Fenomeni di Subsidenza nell’Ambito dei Progetti di Sviluppo Sostenibile di Campi ad Olio e Gas”* emesse dal Dip. DMMMSA dell’Università di Padova nel 2007.

Le specifiche tecniche adottate sono quelle ora in uso per i rilievi della rete Eni e rispettano le indicazioni contenute nelle già citate linee guida emesse dall’Università di Padova.

Eni, inoltre, ha affidato la certificazione della documentazione e della metodologia utilizzata a un ente esterno, che attualmente è il Dipartimento DICAM dell’Università di Bologna.

La rete di livellazione, rilevata nel 2017 (ultimo rilievo fatto), è stata ampliata con l’aggiunta di uno sbraccio esteso all’area del campo di Agosta.

Tale rete è suddivisa nelle seguenti aree di attività:

- dorsale Adriatica, da Treviso fino a Pesaro, compreso lo sviluppo degli sbracci sul delta del Po, per un totale di circa 1200 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 210 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.



Le operazioni di campagna si sono svolte nel periodo compreso tra agosto e ottobre 2017 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell'ente certificatore.

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti, a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione, determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. Nel tratto di costa, da Pesaro a P.to San Giorgio, antistante alle piattaforme di Barbara NW e Fauzia, con l'acquisizione della campagna 2017, sono in totale disponibili 7 campagne di livellazione eseguite negli anni 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2014 e 2017. Si tratta complessivamente di una serie di misure ancora poco consolidata; il loro esame può consentire valutazioni d'ordine generale in merito alla velocità media di subsidenza del periodo 2006-2017, ma non può ancora essere considerato del tutto esaustivo ai fini del monitoraggio della costa che, comunque, è garantito da altri tipi di rilievo.

Nei prossimi anni, con nuove campagne di misura (il prossimo rilievo è previsto nel 2020) e con il consolidamento dei dati CGPS e dei rilievi SAR, sarà possibile fare interpretazioni più puntuali dei dati di livellazione anche per il tratto a sud di Pesaro.

Si deve notare, inoltre, che i dati di livellazione, misurati sul singolo caposaldo, non sono di solito sufficienti per caratterizzare la distribuzione areale della subsidenza. Tali misure, infatti, possono essere talvolta alterate da "disturbi" accidentali intervenuti nel tempo sui manufatti su cui i capisaldi stessi sono stati materializzati.

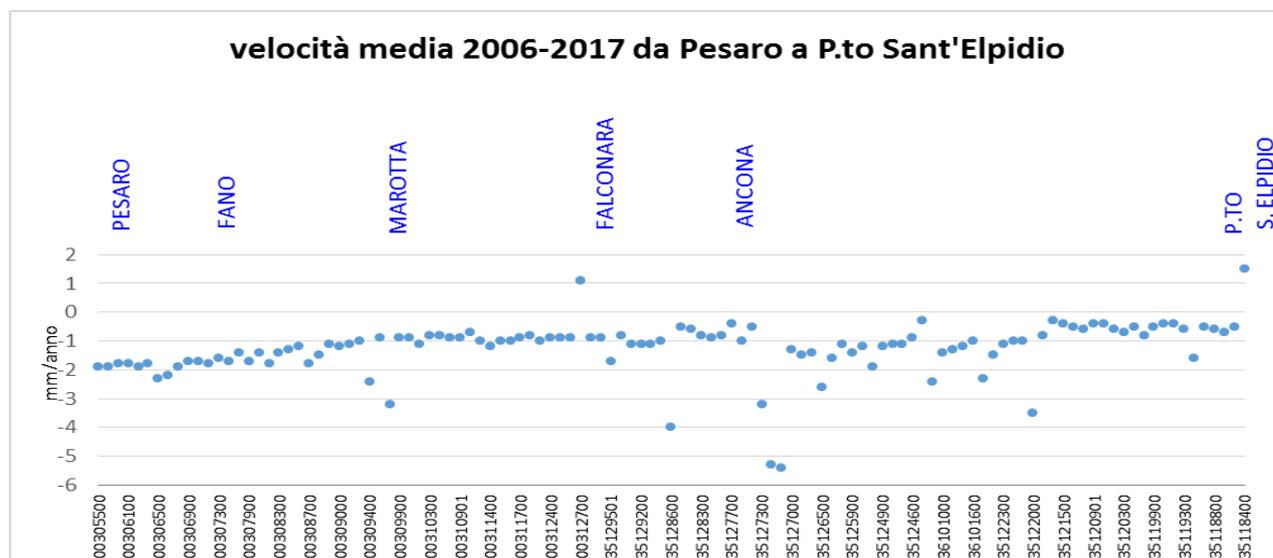
Al fine d'ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori, come di seguito specificato.

A questo proposito si sono stimate con regressione lineare le velocità medie annue d'abbassamento del suolo  $V_a^1$  dei singoli capisaldi della tratta Pesaro - P.to Sant'Elpidio, raggruppandole poi nelle seguenti 5 classi:

- classe 4: include i capisaldi con  $V_a > 10$  mm/a;
- classe 3: include i capisaldi con  $5 \leq V_a < 10$  mm/a;
- classe 2, include i capisaldi con  $3 \leq V_a < 5$  mm/a;
- classe 1: include i capisaldi con  $0 \leq V_a < 3$  mm/a;
- classe 0: include i capisaldi con  $V_a < 0$  (sollevamento del suolo).

L'elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 2006-2017 mostra per l'area in esame un quadro di generale abbassamento (Figura A), caratterizzato, però, da valori poco significativi, ove si consideri che il 93% dei punti analizzati ricade nella classe "1" con una media pari a 1,6 mm/a.

**Figura A – Tratta Pesaro - Sant'Elpidio: velocità medie di subsidenza (periodo 2006-2017)**



I capisaldi per i quali si osservano alte velocità d'abbassamento (es. 5,4 mm/a nella zona di Pesaro), oppure fenomeni d'innalzamento del suolo (es. nella zona di P.to Sant'Elpidio) sono scarsi di numero e isolati: sono, quindi, poco significativi dal punto di vista areale. Non si

<sup>1</sup> Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie) sono riportate con valori negativi. Per comodità d'interpretazione, però, nell'elenco che segue, come pure nei due paragrafi successivi, le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.



possono escludere fenomeni localizzati dovuti a instabilità dei capisaldi stessi, che saranno comunque oggetto di verifica nelle prossime campagne di misura.

Il confronto tra i dati CGPS delle stazioni ubicate nell'area in esame (Fano, Falconara e P.to San Giorgio) con le misure delle livellazioni mostra andamenti che, fatte salve le diverse precisioni in termini di ripetibilità, sono assolutamente compatibili.

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (dicembre 2017) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 8).

Le attività di monitoraggio sono state progressivamente potenziate mettendo in opera un numero crescente di stazioni CGPS sulle piattaforme offshore operate da Eni. Dal 2007, infatti, ne sono state installate sulle piattaforme di Regina e Calpurnia (giugno 2007), di Anemone B (agosto 2007), di Annalisa (ottobre 2007), di Calipso, Tea-Lavanda-Arnica, Clara Est e Clara Nord (novembre 2007), di Barbara NW (gennaio 2008), di Bonaccia (febbraio 2008), di Annamaria A e Annamaria B (gennaio 2010), di Clara W (ottobre 2010) e di Guendalina (agosto 2011). Le stazioni CGPS di Naide e PCC sono, invece, operative dal luglio 2005, mentre la postazione Naomi-Pandora è attiva dal giugno 2002. In tempi più recenti sono state installate anche le nuove stazioni CGPS di Elettra (luglio 2014), di Fauzia (settembre 2014), di Barbara E (novembre 2014), di Bonaccia NW (settembre 2015), e, infine di Clara NW (marzo 2016). Le serie storiche di misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2015 - 2016, sono, però, ancora troppo brevi per consentire valutazioni specifiche.

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche SSU (Satellite Survey Unit) equipaggiate ciascuna con un CGPS, un caposaldo di livellazione geometrica e 2 bersagli radar solidalmente connessi tra loro tramite una trave di cemento armato. Le 3 stazioni SSU sono state realizzate nelle Centrali Eni di Rubicone, di Fano e di Falconara nel dicembre 2007 (Appendice B); negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche tre pozzi assestometrici per il monitoraggio della compattazione superficiale del terreno. Tali stazioni si sono aggiunte a quelle preesistenti, installate più a Nord lungo la costa ravennate, nelle località di Fiumi Uniti, di Smarlacca e di Spinaroni.



Inoltre, come detto in precedenza, sono state monumentate altre 4 stazioni CGPS in Ortona, Pineto, Grottammare e P.to Sant'Elpidio, il cui completamento è avvenuto nel dicembre 2009, tutte equipaggiate con 2 bersagli radar e con un caposaldo di livellazione.

Allo stato attuale la stazione di Ortona non è, però, più operativa dal 19 aprile 2013 per l'alienazione dell'area. Nel novembre 2016, infine, è stata messa in opera una nuova postazione CGPS a Miglianico (completata con i *corner reflector* nel mese di maggio 2017) che, una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, entrerà a fare parte delle stazioni utilizzate per il monitoraggio della stabilità della costa.

Analogamente a quanto avviene per le livellazioni, anche i dati del monitoraggio CGPS sono validati da un ente esterno. Attualmente questa attività è svolta dall'Università degli Studi di Bologna, facoltà di Fisica – Dipartimento di Fisica e Astronomia DIFAS.

I dati CGPS acquisiti sulla piattaforma di Barbara-NW, certificati fino al 2015 e in fase di certificazione per gli anni successivi, sono stati elaborati con il software scientifico Bernese dalla ditta e-GEOS. Per rappresentare in grafici plano-altimetrici la serie storica più completa di misure, ovvero quella estesa al 31/12/2017 (Figura 9), si sono utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati come mostrato in Tabella 2.

**Tabella 1 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2015**

Stazione	Dati Non Certificati			Dati Certificati			Delta (Non Cert.-Cert.)		
	VEL-N mm/a	VEL-E mm/a	VEL-H mm/a	VEL-N mm/a	VEL-E mm/a	VEL-H mm/a	D-N mm/a	D-E mm/a	D-H mm/a
Barbara NW	5,8	32,97	-29,85	5,18	33,70	-32,05	0,62	-0,73	-2,2

A questo proposito è opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche CGPS, da utilizzarsi per una verifica/taratura dei modelli previsionali di subsidenza, non possono essere considerate sufficientemente attendibili per dataset relativi a periodi di osservazione inferiori ai 36 mesi, come indicato dall'Ente che certifica tali dati con cadenza biennale.

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine di poter disporre di un numero sufficiente di osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche,



della loro incidenza sulle misure e per poter filtrare il “rumore” che, per piccole velocità di subsidenza, è dello stesso ordine di grandezza del valore del fenomeno fisico osservato. Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, quindi, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori sufficientemente elevati. In questi casi sarà possibile monitorare solo eventuali anomalie di trend ma non procedere a un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

- dataset < 12mesi: solo *follow up* per monitoraggio dei dati acquisiti;
- dataset di 12 ÷ 36 mesi e
  - piccoli valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il trend previsionale;
  - grandi valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;
- dataset > 36 mesi: analisi di trend e calibrazione dei modelli geomeccanici confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

Le elaborazioni sono state fatte con *software* scientifico Bernese, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Nel corso del 2013, a seguito del rilascio del nuovo sistema di riferimento, sono stati rielaborati tutti i dati secondo il sistema ITRF2008-IGB08, al quale fanno riferimento i grafici della presente relazione. Dalle prossime relazioni i dati saranno riferiti al sistema di riferimento ITRF2014, reso disponibile nel 2017 e per il quale è necessaria la rielaborazione di tutte le serie storiche esistenti. Per le nostre elaborazioni il sistema di riferimento è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli outlier delle serie storiche è effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo. Per il campo di Barbara-NW, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi - anche se parzialmente incompleta a causa delle operazioni di *work-over* in piattaforma da agosto 2010 a luglio 2011 - è possibile stimare una velocità media di



subsidenza totale<sup>1</sup> pari a -29,3 mm/a (Figure 9 e 11), senza variazioni significative rispetto a quanto riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-29,6 mm/a al 2016).

Nell'ambito della serie storica dei dati CGPS disponibile è, inoltre, possibile individuare alcune variazioni di velocità correlabili con la storia produttiva del campo (Figura 10).

In particolare:

- periodo che va dall'installazione del CGPS all'agosto 2010 (inizio *work-over*), in cui la velocità media di subsidenza totale è pari a circa -4,4 mm/a;
- periodo luglio 2011 - 31 dicembre 2017, in cui la velocità media di subsidenza totale è pari a circa -29,7 mm/a, mostrando un rallentamento rispetto ai valori calcolati a fine 2016 (-34,7 mm/a).

Si segnala altresì che eventuali piccole differenze nelle stime delle velocità, che si possono verificare rielaborando in epoche successive i dati CGPS, dipendono anche dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta sia l'elaborazione di un modello periodico più attendibile, sia la ridefinizione degli outliers, che sono determinati mediante il test a tre sigma su tutta la serie storica esistente. Tenuto conto di quanto sopra detto e del fatto che i dati CGPS del 2017 non sono ancora stati certificati, si sono tuttavia confrontati i valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico del dicembre 2017 con quelli misurati dalla stazione CGPS, senza che questi ultimi siano stati depurati dalla componente di subsidenza naturale. Come mostrato dalla Figura 12, tale confronto conferma l'attendibilità dell'attuale modello di subsidenza e le previsioni fornite relativamente allo scenario di riferimento. In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza, la notevole distanza del campo dalla costa (55km) e i monitoraggi fatti da Eni consentono di escludere che l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione di gas dal campo di Barbara NW possa avere qualche impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale monitorato.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 13 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 14 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

---

<sup>1</sup> La "subsidenza totale" rappresenta in questo caso l'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma su cui è installato il CGPS. A determinare tale "subsidenza totale" concorrono vari fenomeni: la compattazione di strati profondi per estrazione di gas (subsidenza antropica), movimenti tettonici e costipazione naturale dei sedimenti (subsidenza naturale), compattazione dei sedimenti più superficiali a fondo mare per effetto del peso della piattaforma. Quest'ultimo fenomeno è evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa.



Figura 1 - Ubicazione del campo di Barbara NW

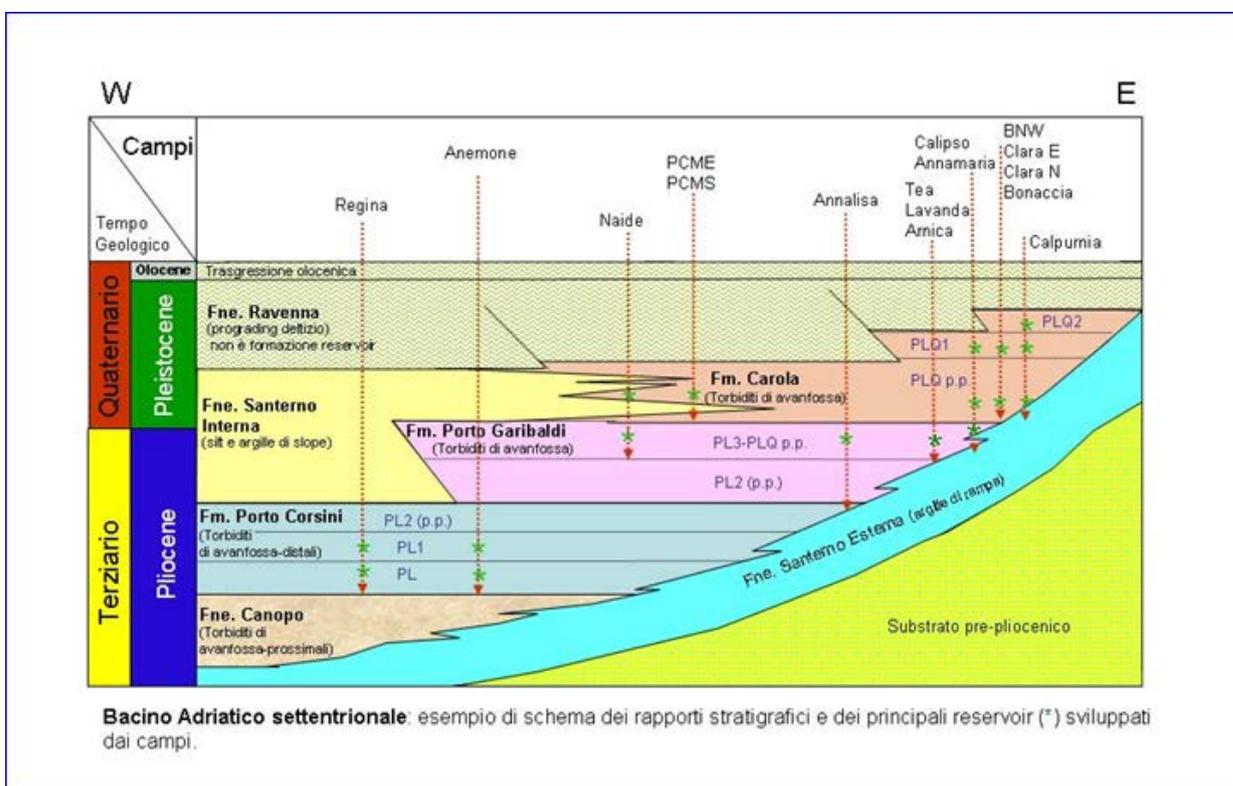


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici



CAMPO DI BARBARA NW					
ANNO	Produzione annuale (MSm <sup>3</sup> )		Produzione cumulativa (MSm <sup>3</sup> )		Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE
	Reale	Modello 3D ECLIPSE	Reale	Modello 3D ECLIPSE	
1999	67	67	67	67	2%
2000	211	211	278	278	10%
2001	170	170	449	449	16%
2002	112	112	560	560	20%
2003	76	76	636	636	23%
2004	49	49	686	686	25%
2005	50	50	736	736	27%
2006	53	53	788	788	29%
2007	40	40	829	829	30%
2008	53	53	881	881	32%
2009	31	31	912	912	33%
2010	53	53	966	966	35%
2011	292	292	1258	1258	46%
2012	272	272	1529	1529	56%
2013	174	174	1703	1703	62%
2014	130	130	1832	1832	67%
2015	91	91	1923	1923	70%
2016	60	60	1983	1983	72%
2017	32	36	2015	2019	74%
2018		113		2131	
2019		108		2240	
2020		96		2336	
2021		88		2424	
2022		79		2503	
2023		60		2563	
2024		46		2609	
2025		35		2644	
2026		27		2671	
2027		19		2689	
2028		14		2703	
2029		10		2714	
2030		8		2721	
2031		6		2727	
2032		4		2731	
2033		3		2734	
2034		2		2736	
2035		1		2737	

Figura 3a – Campo di Barbara NW: tabella e grafici di produzione vs. modello *Eclipse* (09/2017)

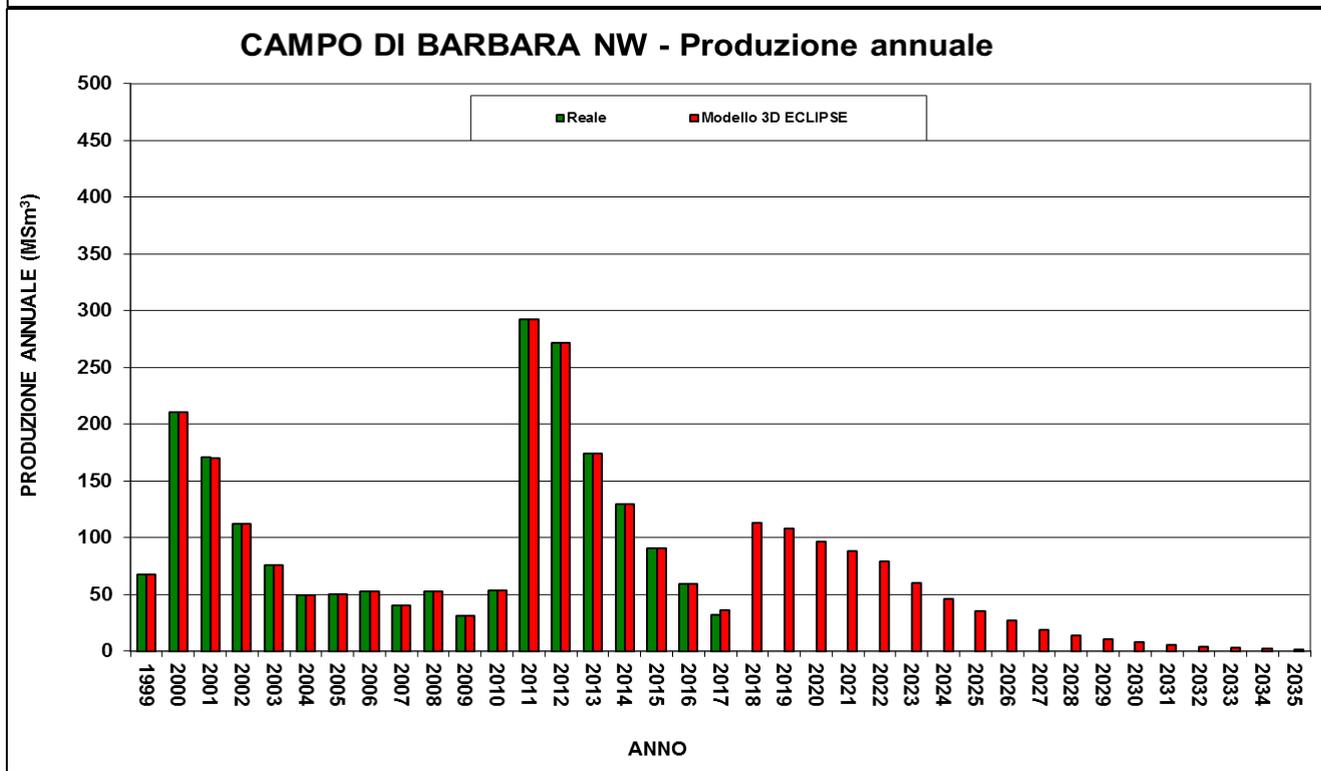
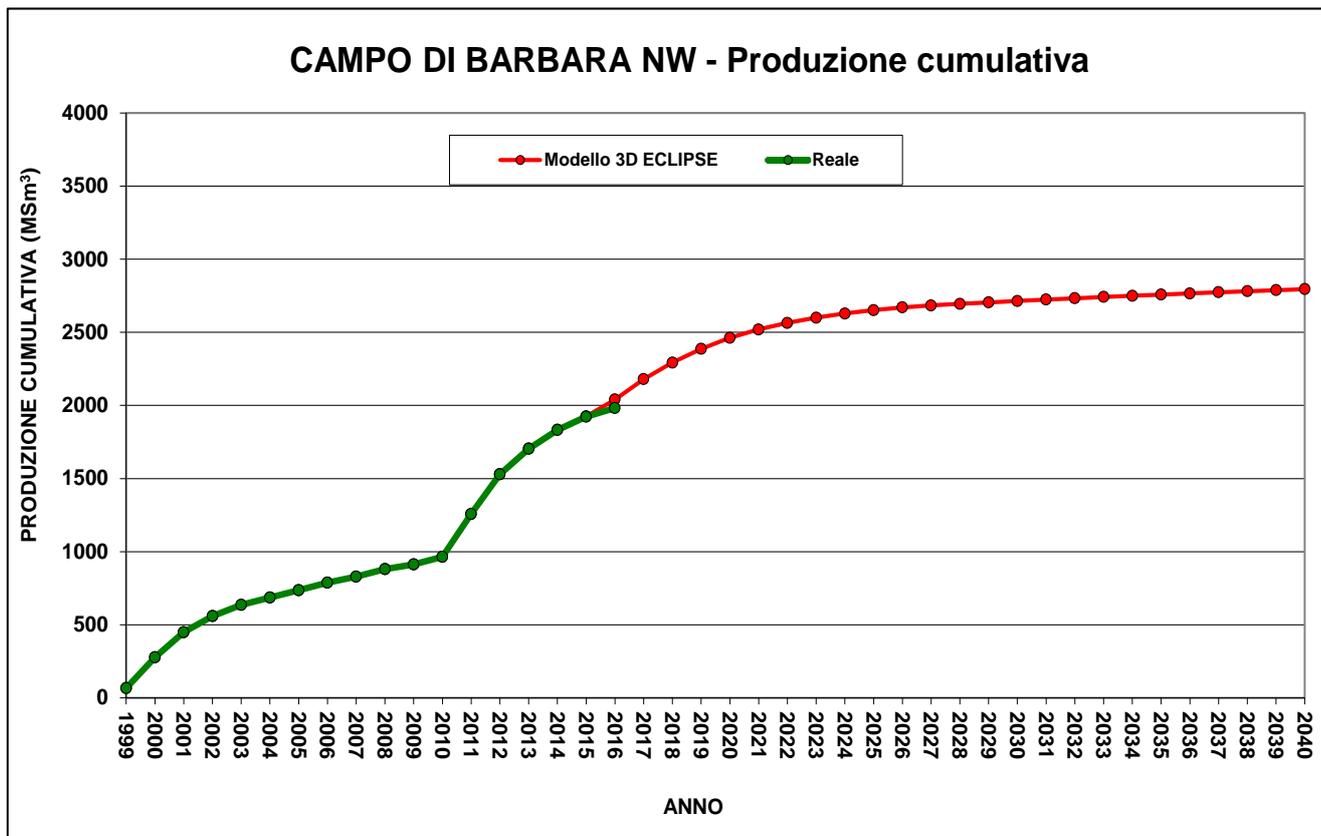


Figura 3b – Campo di Barbara NW: tabella e grafici di produzione vs. modello *Eclipse* (09/2017)

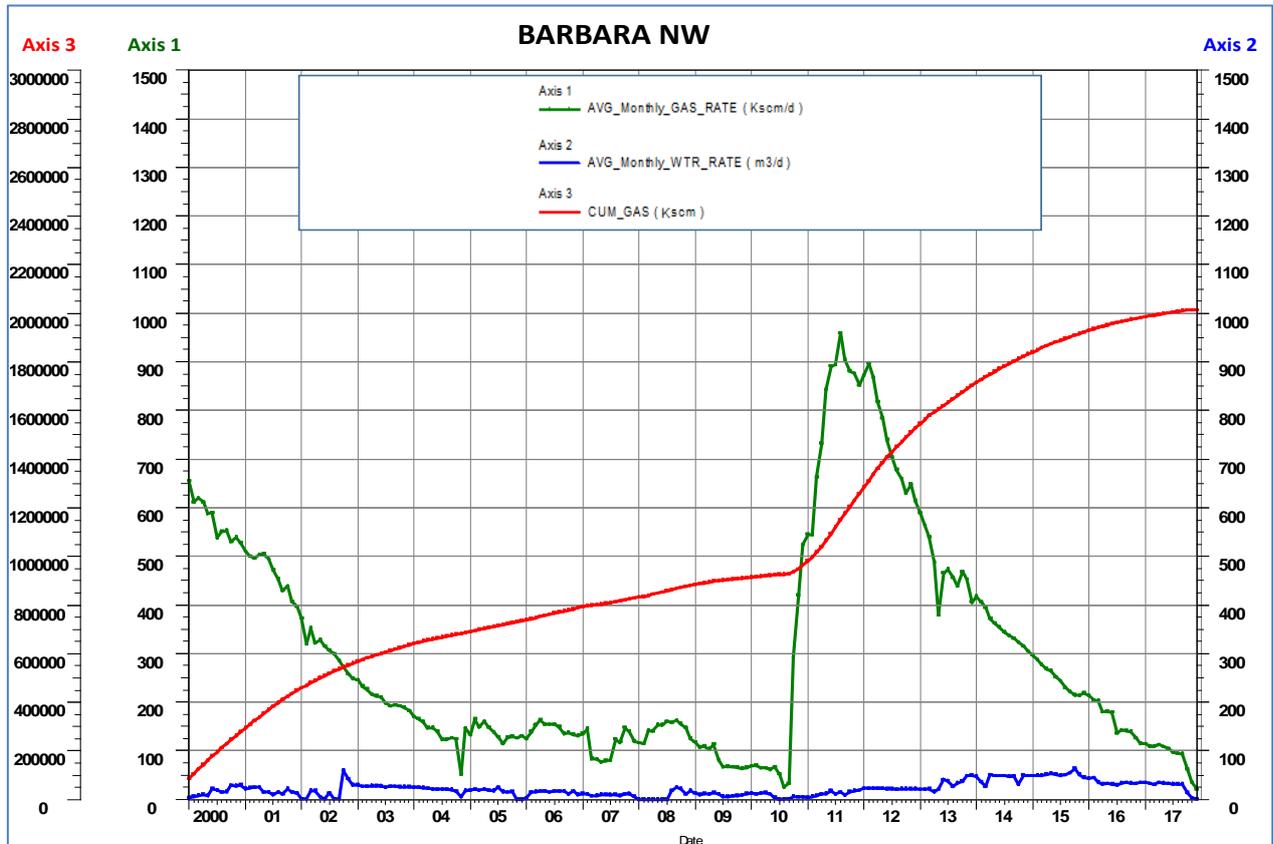


Figura 4 – Campo di Barbara NW: grafico della produzione storica

CAMPO DI BARBARA NW						
Data	Livelli PLQ-C1+C2			Livelli PLQ-B+C1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
14/03/1999	112	6 Dir		111	6 Dir	
25/11/2004	99		6 C	92		7 C
31/01/2008				101		7 C
15/02/2010	102		6 C	97		7 C
02/09/2010	104	10 Dir		104	10 Dir	
19/05/2011	101	5 Dir A				
23/10/2013	100		9 L			
02/12/2014	99		9 L			
10/08/2015	100		9 L			
06/10/2016	101		9 L			
06/07/2017	100		9 L			

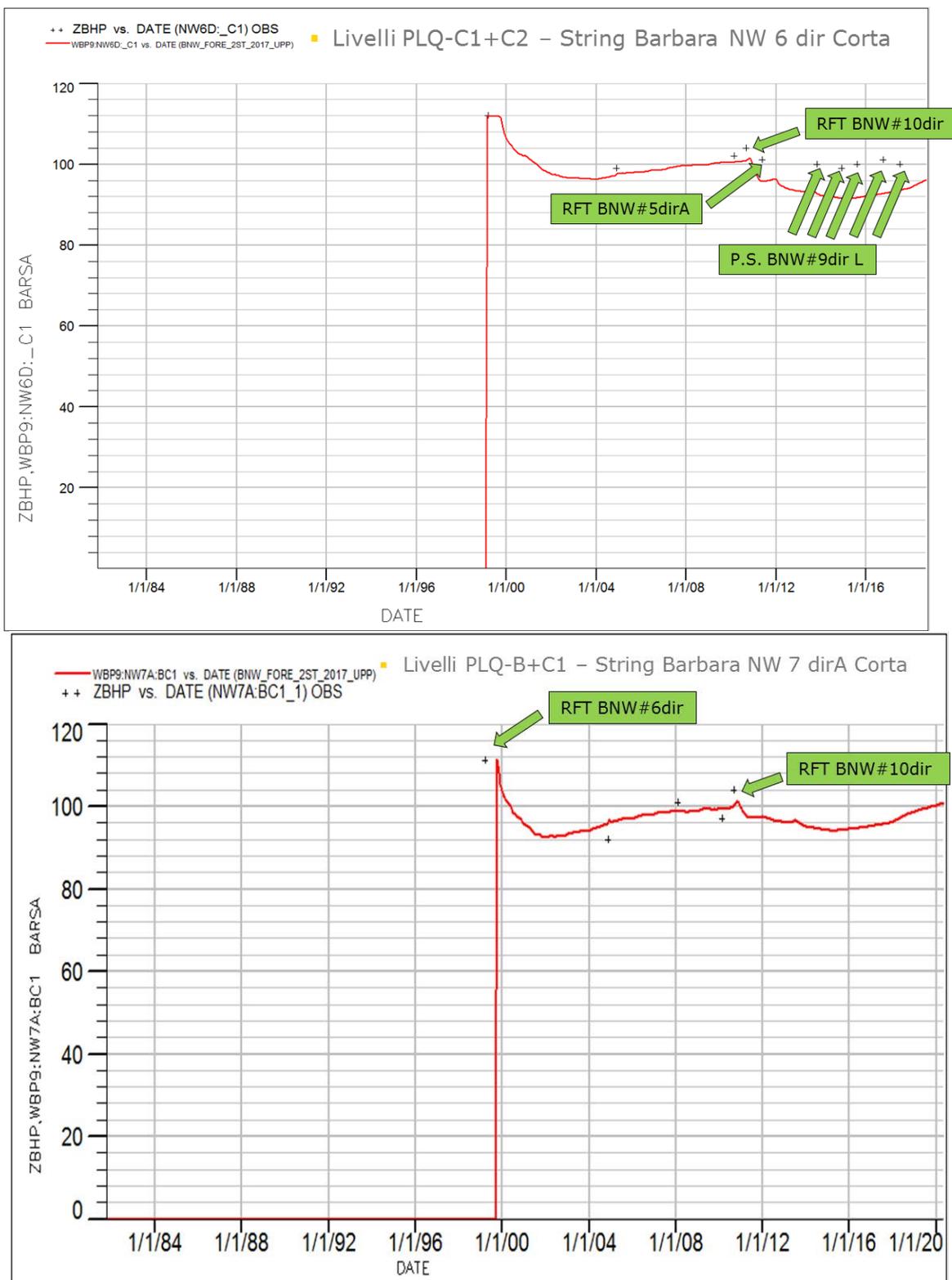


Figura 5 – Campo di Barbara NW: confronto tra i dati di pressione misurati e modello *Eclipse* (livelli PLQ-B+C1e PLQ-C1+C2)

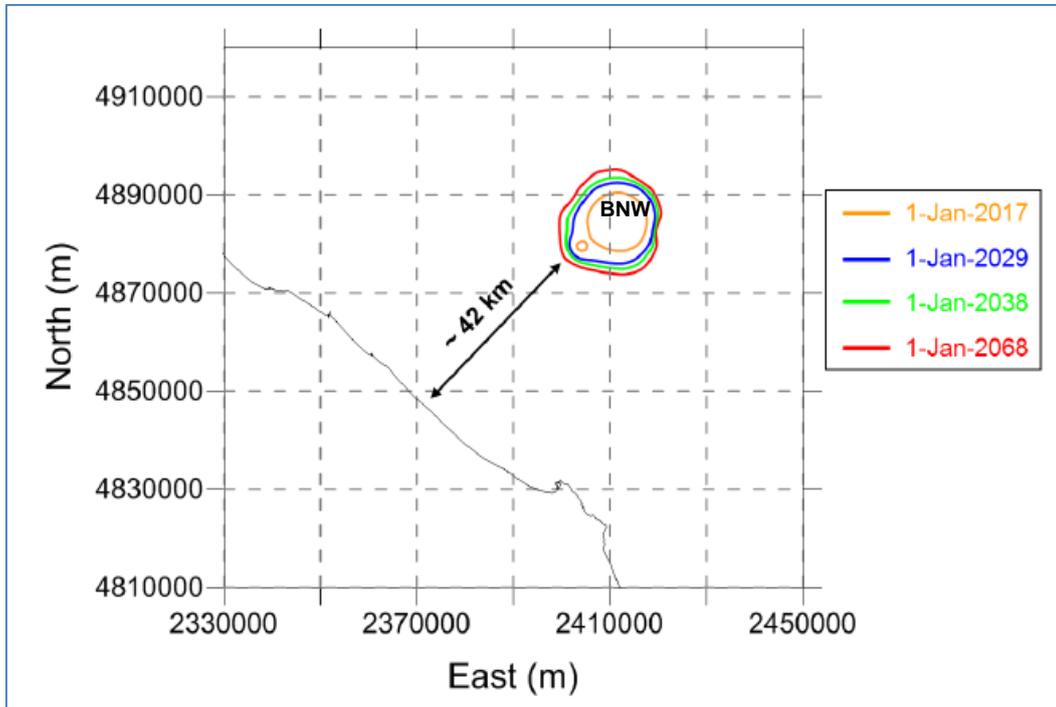


Figura 6 – Campo di Barbara NW e Fauzia: evoluzione temporale della linea di isosubsidenza dei -2cm per lo scenario SVIL\_MNO2

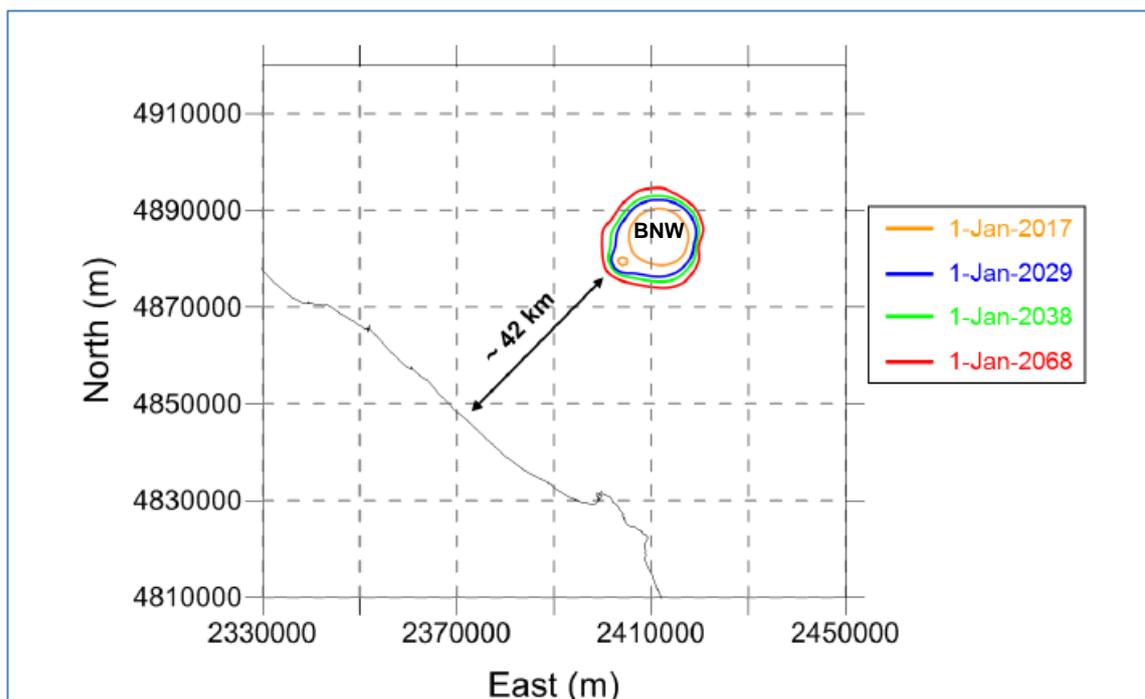


Figura 7 – Campo di Barbara NW e Fauzia: evoluzione temporale della linea di isosubsidenza dei -2cm per lo scenario SVIL\_M2

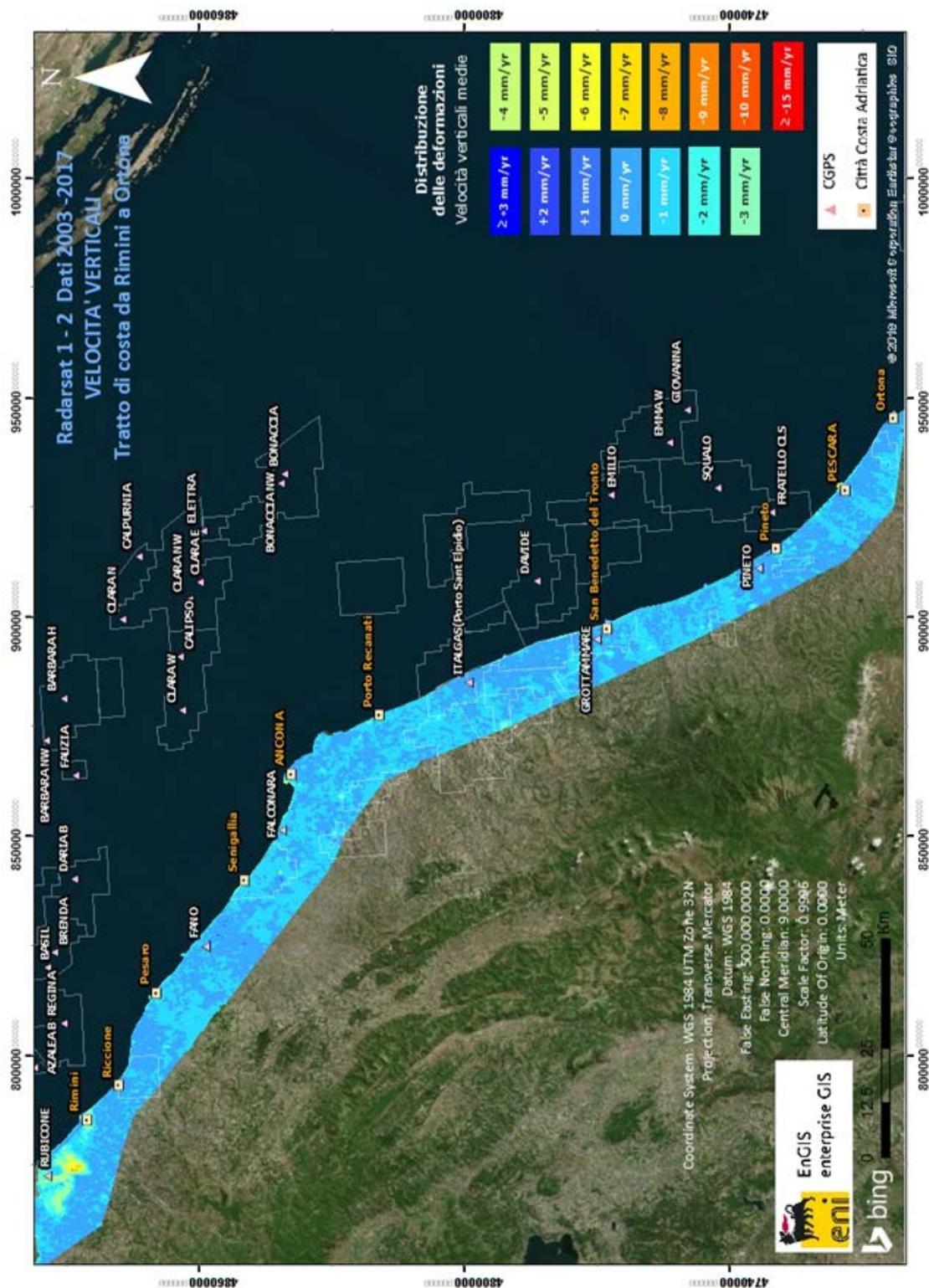
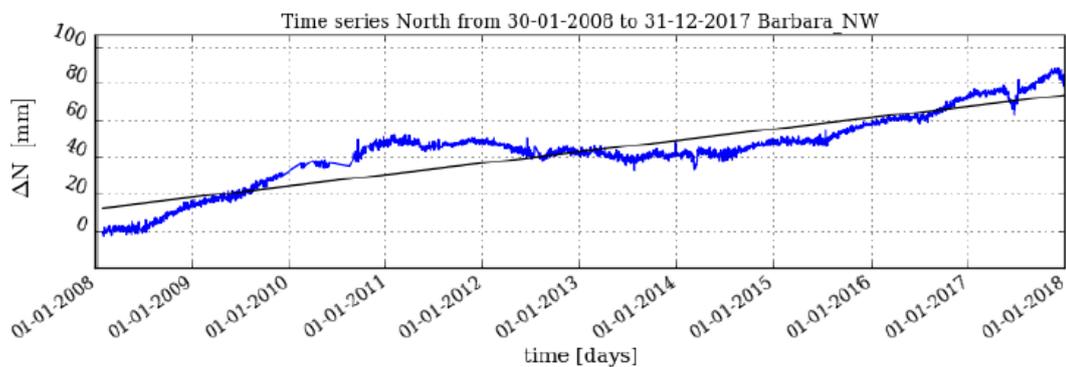


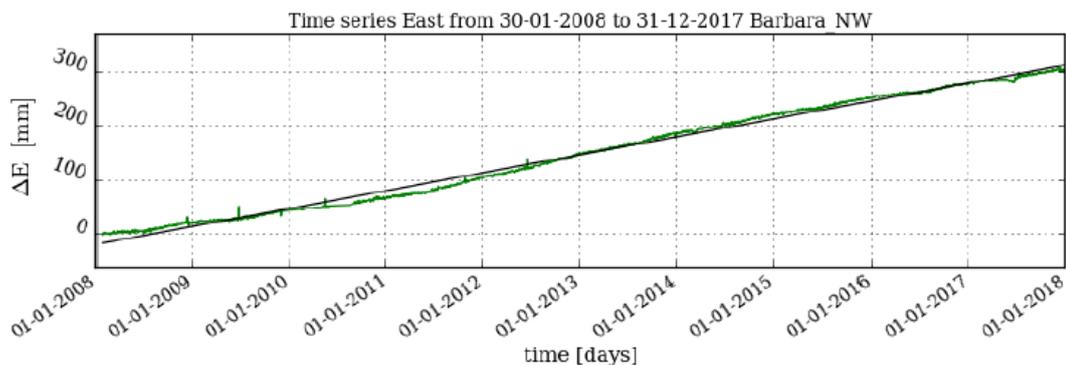
Figura 8 – Campo di Barbara NW: analisi dati SAR dal 2003 al 2017



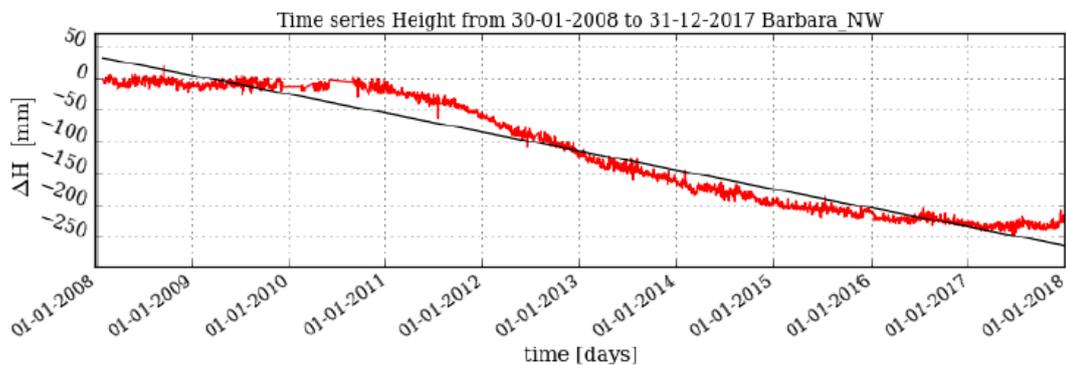
### Time series ITRF2014 Barbara\_NW



$V_{d_n} = 6.39 \pm 0.05$  mm/y  
 $WRMS_n = 8.35$  mm  
 $\chi^2 / DOF = 415.9$

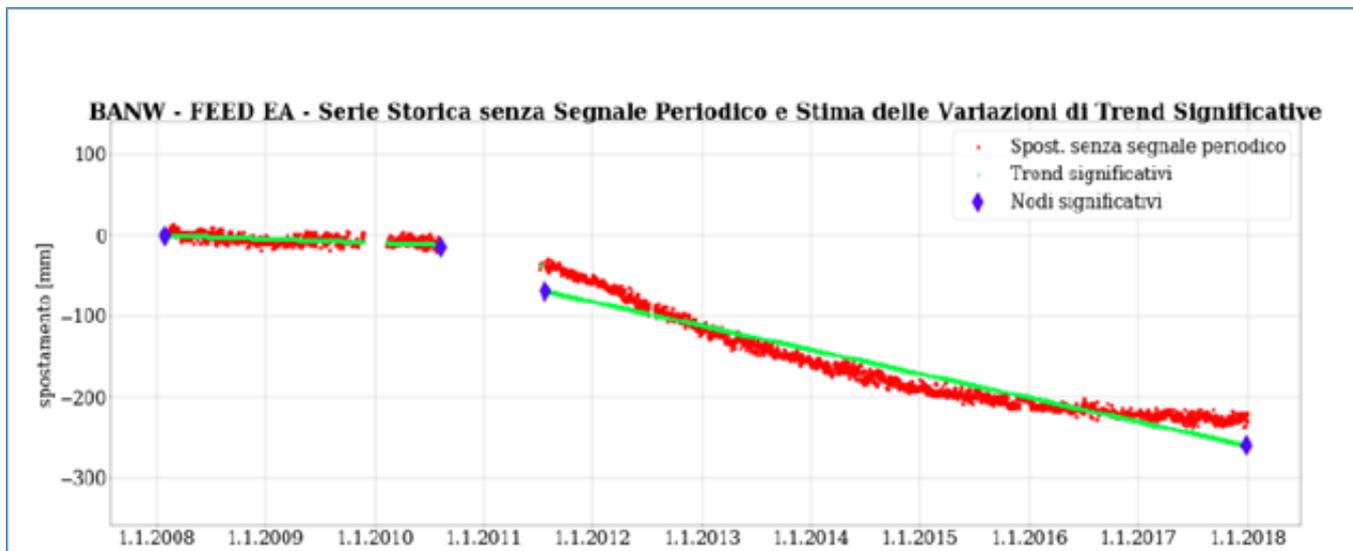


$V_{d_e} = 32.91 \pm 0.04$  mm/y  
 $WRMS_e = 7.43$  mm  
 $\chi^2 / DOF = 473.66$



$V_{d_h} = -29.26 \pm 0.12$  mm/y  
 $WRMS_h = 20.16$  mm  
 $\chi^2 / DOF = 209.92$

Figura 9 – Campo di Barbara NW: serie storica di misure CGPS



FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo	velocità	sigma	
-	[mm/y]	[mm/y]	
30/01/2008 - 14/08/2010	-4.35	0.72	
06/07/2011 - 31/12/2017	-29.73	0.16	

**Note:** La piattaforma in cui è installata la stazione CGPS Barbara NW ha avuto delle attività di work-over nel periodo agosto 2010 – luglio 2011. Nonostante gli apparati siano stati alimentati durante il periodo del w-o, si è scelto di non utilizzare i dati acquisiti dalla stazione CGPS a causa della loro degradata qualità. La presenza infatti degli impianti in prossimità della stazione hanno causato un aumento del multipath e del n. di cycle slip.  
La mancanza di dati relativa al periodo 07/12/2009 – 12/02/2010 è da attribuirsi al riempimento della memoria del ricevitore della stazione che in quel periodo era configurata in modalità stand-alone.

Figura 10 – Campo di Barbara NW: analisi della serie storica di misure CGPS



CAMPO	Inizio produzione	Fine produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse)	Riserve prodotte @ dic.2017	Max subsidenza prevista (caso di riferimento)	Ultimo aggiornamento studio	CGPS				
						inizio registrazione	vel.media (mm/a) @ dic.2016	vel.media (mm/a) @ dic.2017	TREND rispetto @ dic. 2016	mesi di registrazione
ANEMONE	1978	2018	100%	-39cm al 2048	2015	giu-07	-4,7	-4,5	invariato	110
ANNALISA	2000	2023	94%	-10cm al 2027	2014	ott-07	-4,1	-3,6	diminuzione	93
ANNAMARIA B	2009	2030	73%	-163cm al 2031	2017	gen-10	-108,6	-109,6	aumento	93
BARBARA NW	1999	2035	74%	-44cm al 2029	2017	gen-08	-29,6	-29,3	diminuzione	106
BONACCIA	1999	2035	65%	-423cm al 2033	2014	dic-07	-76,2	-75,0	diminuzione	119
BONACCIA NW	2015					set-15	n.d.	-59,8	n.d.	27
CALIPSO	2002	2025	81%	-85cm al 2026	2017	nov-07	-15	-14,8	diminuzione	116
CALPURNIA	2000	2022	99%	-14cm al 2015	2017	giu-07	-2	-1,4	diminuzione	110
CLARA EST	2000	2038	59%	-129cm al 2037	2017	nov-07	-13,4	-13,7	invariato	122
CLARA NW	2016			-97cm al 2061		mar-16	n.d.	-24,2	n.d.	21,5
CLARA NORD	2000	2021	99%	-34cm al 2016	2017	nov-07	-23,6	-22,1	diminuzione	122
ELETTRA	2014	2029	58%	-11cm al 2061	2017	lug-14	-23,6	-24,2	aumento	41
FAUZIA	2014	2020	94%	-5cm al 2068	2017	set-14	-5,5	-4,9	diminuzione	39
GUENDALINA	2011	2023	98%	-3cm al 2023	2014	ago-11	-5,4	-5,5	invariato	76
NAIDE	2005	2020	95%	-8cm al 2020	2017	giu-05	-3,4	-3,3	invariato	150
NAOMI - PANDORA	2001	2037	48%	-4,7cm al 2049	2017	giu-02	-1,5	-1,5	invariato	186
PCME (PMS)	2001	2014	100%	-5,4cm al 2020	2016	lug-05	-3,8	-3,7	invariato	149
REGINA	1997	2030	97%	-130cm al 2061	2017	giu-07	-25,5	-23,7	diminuzione	126
TEA - LAVANDA - ARNICA	2007	2018	103%	-5cm al 2018	2015	nov-07	-4,3	-3,7	diminuzione	122

Figura 11- Velocità medie di “subsidenza totale” calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

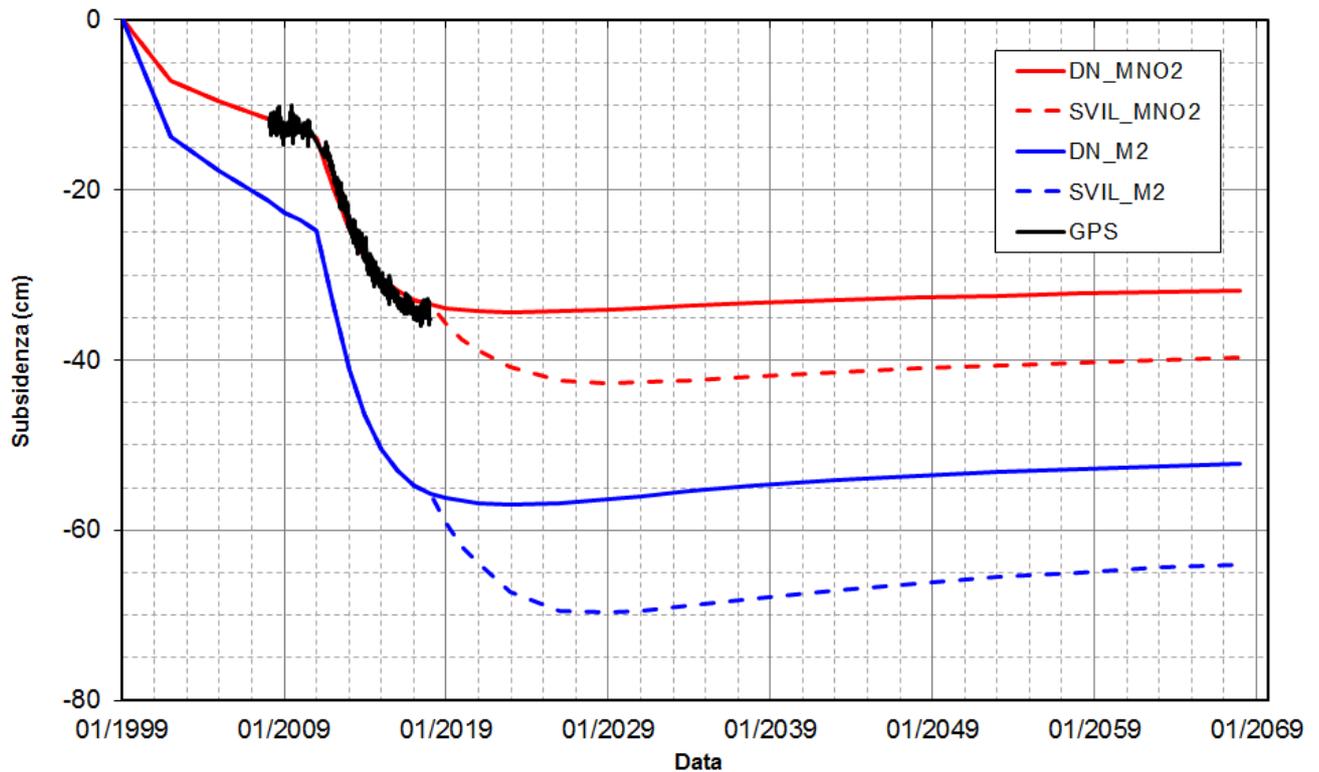


Figura 12 – Campo di Barbara NW: misure CGPS vs. previsioni di subsidenza da modello geomeccanico (in corrispondenza della piattaforma)



DATI DI CAMPO			DECRETO VIA n. 3477 del 15 DICEMBRE 1998		
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE			AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (BARBARA NW)		
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE			SIA MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "SETT. '95" RISERVE (MSm <sup>3</sup> ) MOD. GEOMECCANICO MAX SUBS AL CENTRO (cm) MAX DIST. DAL CULMINE (km)		
CONCESSIONE			STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI		
DATA SCADENZA CONCESSIONE			LIVELLAZIONI		
N. POZZI			MARKERS		
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )			CGPS		
START UP PRODUZIONE			SAR		
FINE PRODUZIONE PREVISTA					
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> )					
% RISERVE PRODOTTE					

Figura 13 – Campo di Barbara NW: scheda di sintesi dati campo

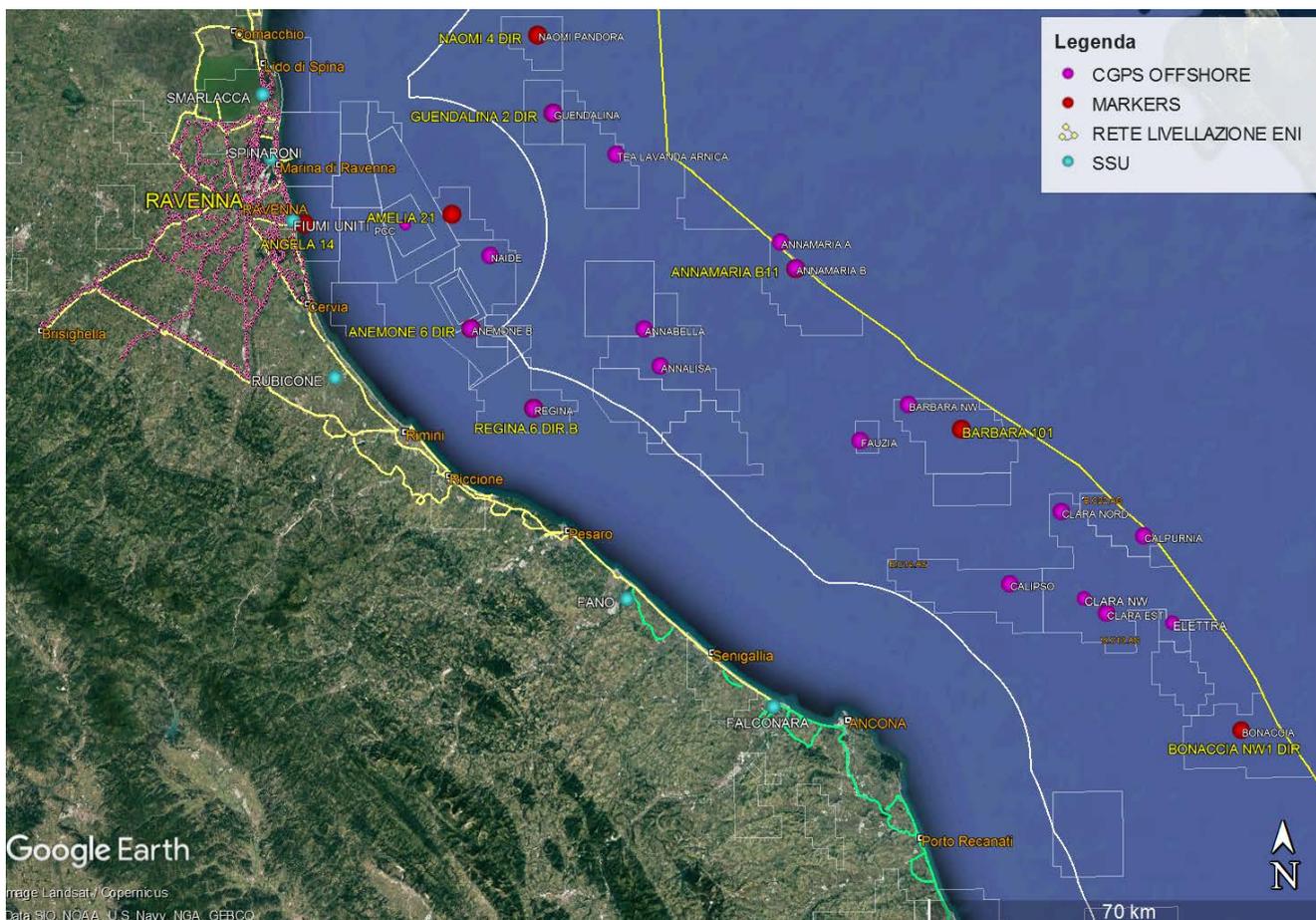


Figura 14 - Particolare della rete di monitoraggio Eni



## Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2017

I dati InSAR del periodo 2003 – 2017 sono stati elaborati con un algoritmo diverso da quello utilizzato negli scorsi anni, essendo cambiato ad aprile 2017 il contrattista fornitore del servizio (Telespazio/e-GEOS).

Il nuovo algoritmo impiegato sarà descritto in seguito con maggior dettaglio (si veda la sezione “Tecnica PSP-DIFSAR”) allo scopo di evidenziare le differenze dei principali algoritmi utilizzati nell’elaborazione delle misure d’interferometria radar.

A valle dell’analisi dei dati interferometrici 2003 - 2017 si può, comunque, affermare che la qualità dei risultati ottenuti con il nuovo procedimento di elaborazione è del tutto comparabile con quella dei risultati riportati nella precedente relazione per il periodo 2003 – 2016.

### Analisi dati InSAR 2003 – 2017

L’analisi dei dati SAR ha interessato complessivamente dieci data-set, relativi ad altrettante aree geografiche, processati in modo tale da garantire continuità spaziale dei dati.

L’analisi delle differenze tra le componenti verticali delle velocità medie annuali di deformazione del suolo misurate dai CGPS installati nell’area in esame, e quelle ottenute dalle immagini SAR retroriflesse dai bersagli PS (*Permanent Scatterer*) situati in una zona circolare (raggio ca. 300 m) intorno alle corrispondenti stazioni CGPS (Tab. 1A), ha consentito d’accorpate le suddette aree geografiche in solo due macro-aree, in modo tale da calibrare i dati InSAR minimizzandone le differenze di valore con le misure CGPS.

A tale proposito si veda la Tab.1A in cui sono riportate:

- sia la componente verticale della velocità media annua misurata dal CGPS (simbolo:  $V_{vert\_CGPS}$ ), sia il relativo scarto quadratico medio (simbolo:  $sqm\_CGPS$ );
- sia la media delle componenti verticali delle velocità medie annue registrate dai PS nell’intorno della corrispondente stazione CGPS (simbolo:  $Media\_V\_SAR$ ), sia il relativo scarto quadratico (simbolo:  $sqm\_SAR$ );
- la differenza tra le velocità CGPS e SAR e i relativi scarti quadratici medi (colonne 7 e 8).

Si noti che tutte le misure sono espresse in mm/a.

**Tab. 1A: taratura dato InSAR con misure CGPS**

	CGPS	V_vert_CGPS [mm/a]	sqm_CGPS [mm/a]	Media_V_SAR [mm/a]	sqm_SAR [mm/a]	Vel (CGPS-Vel SAR) [mm/a]	sqm_diff [mm/a]
RAVENNA	MANARA	-2,52	0,02	0,03	0,83	-2,55	0,85
	SMARLACCA	-6,18	0,01	-2,67	2,12	-3,51	2,13
	SPINARONI	-7,29	0,01	-3,28	1,64	-4,01	1,65
	FIUMI UNITI	-13,99	0,02	-10,96	2,66	-3,03	2,68
FANO-ANCONA	RUBICONE	-2,12	0,04	-2,90	2,03	0,78	2,07
	FANO	0,60	0,03	0,17	0,84	0,43	0,87
	FALCONARA	0,21	0,03	-0,13	1,46	0,34	1,49
	ITALGAS	0,56	0,03	0,47	0,90	0,09	0,93

Come si può osservare in detta tabella le differenze di velocità media tra le misure CGPS e quelle SAR hanno valori che si attestano a circa 3 mm/a per le prime quattro aree, mentre per le seconde quattro tali differenze sono dell'ordine di circa mezzo millimetro.

Per tale motivo si è scelto di mosaicare i dieci diversi data-set in due sole macro-aree denominate (Figura 1A):

1. Area di Ravenna che comprende le stazioni CGPS di Manara, Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti;
2. Area di Fano-Ancona che comprende le stazioni CGPS di Rubicone, Fano, Falconara e Italgas.

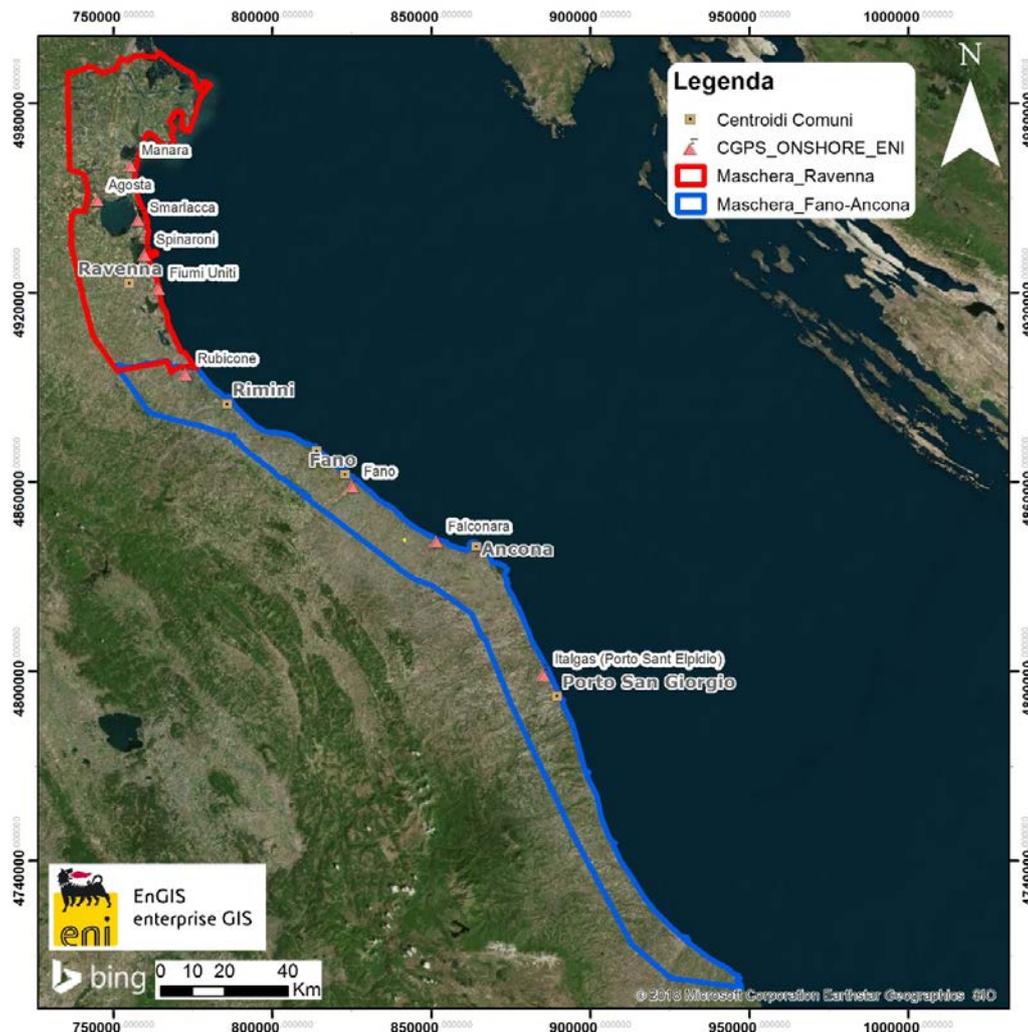


Fig.1A – Mappa mosaicatura dati InSAR

La calibrazione dei dati SAR è stata fatta con le misure CGPS acquisite nelle stazioni CGPS ubicate all'interno delle macro-aree analizzate, procedendo da quelle con la serie storica di dati più consistente (Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti dell'area di Ravenna).

Per il processo di calibrazione si sono utilizzate le misure della velocità verticale di deformazione del suolo dell'area SAR più a nord (area ravennate) e, in particolare, quelle della stazione di Smarlacca. I dati acquisiti nei siti di Fiumi Uniti, di Spinaroni e di Manara sono stati impiegati esclusivamente per la verifica dei risultati ottenuti dalla calibrazione.

Per la valutazione delle velocità verticali di deformazione del suolo fatta con le misure CGPS si è utilizzata tutta la serie storica disponibile di tali misure che, però, per le stazioni CGPS di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti è iniziata a una data leggermente anteriore ri-



spetto a quella d'inizio misure SAR. Si è, comunque, accertato che i valori di velocità così ottenuti differiscono in modo del tutto trascurabile ( $< 1$  mm/a) rispetto a quelli che si otterrebbero dagli stessi dati CGPS, utilizzando però una serie storica di misure leggermente ridotta, avente cioè la stessa data d'inizio di quella dei dati SAR.

L'analisi dei dati SAR non calibrati e acquisiti in un'area circolare (raggio di circa 300 m) intorno alla stazione CGPS di Smarlacca, ha consentito di stimare una velocità media d'abbassamento del suolo di  $-2,67 \pm 2,12$  mm/a. Dato che la corrispondente velocità media ottenuta dalle misure del CGPS di Smarlacca è di  $-6,18 \pm 0,01$  mm/a, si ha uno scostamento fra le due misure di  $-3,51 \pm 2,13$  mm/a. Ai valori di velocità media della componente verticale, determinata con il monitoraggio SAR, si è applicata, pertanto, una correzione pari a  $-3,51 \pm 2,13$  mm/a. Si sono poi confrontati tali dati SAR con le misure dei CGPS di Manara, di Spinaroni e di Fiumi Uniti considerando i punti SAR disponibili in un'area circolare (raggio pari a 300 m) intorno a tali stazioni. Il confronto ha mostrato differenze mediamente inferiori a 1 mm/a tra le misure CGPS e i dati SAR calibrati, confermando la bontà del procedimento seguito. In Figura 2A sono rappresentati i dati InSAR ottenuti a valle del processo di calibrazione per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Porte Tolle a Cesenatico. Tali dati sono stati ricavati per interpolazione con un algoritmo di IDW (*Inverse Distance Weighted*) mediante *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>.





Come già effettuato nel 2016, l'altro data set (Area di Fano-Ancona, vedi Fig.1A), è stato analizzato separatamente da quello dell'area Ravennate in quanto, come spiegato in precedenza, per ciascuna delle due macro-aree una buona coerenza delle misure SAR con quelle delle stazioni CGPS ubicate al loro interno.

Con il consolidarsi della serie storica di dati SAR (14 anni circa) si è notato, inoltre, come la calibrazione in sequenza delle diverse aree – a partire da quella di Ravenna e impiegando un valore di calibrazione ottenuto come media di valori di velocità verticale nelle zone di frontiera tra le aree contigue - introduca un errore sistematico. Tale errore, che consiste in uno spostamento verticale fittizio probabilmente dovuto anche alla propagazione della varianza, non deve essere trascurato nelle calibrazioni “a catena”.

L'analisi dell'area SAR dell'area di Fano-Ancona mostra che le velocità verticali di deformazione del suolo registrate dalle stazioni CGPS di Rubicone, di Fano, di Falconara e di Italgas sono del tutto allineate con quelle misurate dal SAR: la differenza è inferiore al millimetro. Si noti che il confronto è stato fatto per una zona circolare (raggio di ca. 300 m) intorno a ogni stazione, e che le velocità verticali dei dati SAR sono una media delle misure relative ai permanent scatterer che ricadono all'interno di tale zona.

Si sono, pertanto, calibrati i dati InSAR dell'area Fano-Ancona con la misura della velocità media annua del CGPS di Fano, sommando ai primi il valore di  $+0.43 \pm 0,87$  mm/a.

Si sono poi confrontate le misure calibrate dei punti SAR appartenenti a una zona circolare (raggio di ca.300 m) intorno alle stazioni CGPS di Rubicone, di Falconara e Italgas, con i corrispondenti dati CGPS acquisiti in tali stazioni. Il confronto mostra differenze che sono in media di circa mezzo millimetro a conferma della validità della calibrazione fatta.

In Figura 3A è riportata l'interpolazione dei dati mosaicati per l'area Fano-Ancona nel tratto di costa da Rimini a Ortona. Anche in questo caso si è impiegato l'algoritmo di IDW (*Inverse Distance Weighted*) mediante *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>.

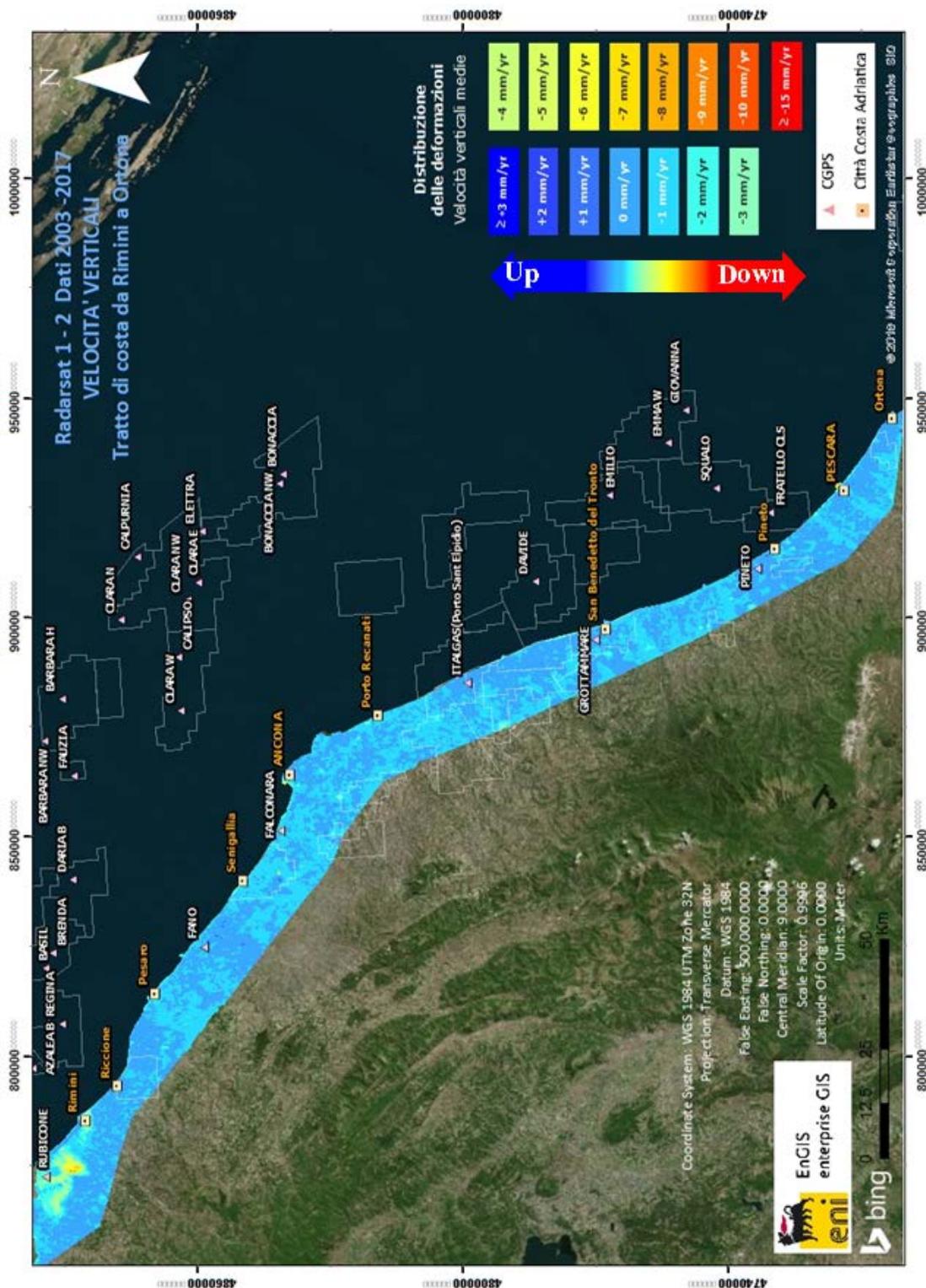


Fig.3A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 - 2, per il periodo 2003 – 2017, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini a Ortona



### **Confronto dati SAR 2003 – 2016 vs 2003 – 2017**

Un confronto diretto tra i dati SAR relativi ai periodi 2003 – 2016 e i dati 2003 – 2017 per l'intero tratto di costa da Porto Tolle a Ortona non è fattibile in quanto, come già detto, le analisi dei dati SAR 2017 sono state effettuate con un algoritmo e perimetrazioni differenti rispetto all'anno precedente. Il confronto quantitativo sarà, pertanto, possibile solo quando saranno disponibili i dati acquisiti nel 2018.

### **Confronto dati SAR vs Livellazione**

Si sono confrontate le velocità medie annue di subsidenza misurate con la livellazione geometrica con le corrispondenti velocità ottenute dai dati SAR calibrati e interpolati con algoritmo IDW (*Inverse Distance Weighted* con *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>).

Tale confronto, che è stato fatto con riferimento agli stessi capisaldi, non evidenzia differenze macroscopiche: entrambi i metodi di misura - tenuto conto della loro deviazione standard per effetto dell'errore strumentale - non presentano anomalie evidenti, come si può osservare nelle figure allegate.

In particolare, queste ultime sono così riferibili:

- alla tratta Codigoro-Cervia: Figure 4A e 5A,
- alla tratta Cervia-Pesaro: Figure 6A e 7A;
- alla tratta Pesaro-Porto San Giorgio: Figure 8A e 9A.

In quest'ultima tratta (Pesaro - Porto San Giorgio) si notano alcuni improvvisi picchi (“*spikes*”) nei valori di velocità di subsidenza delle livellazioni che non compaiono nei corrispondenti valori di velocità da misure SAR. Tali anomalie potrebbero essere state causate da instabilità dei relativi capisaldi, e saranno, quindi, oggetto di specifici controlli nelle prossime campagne di livellazione.

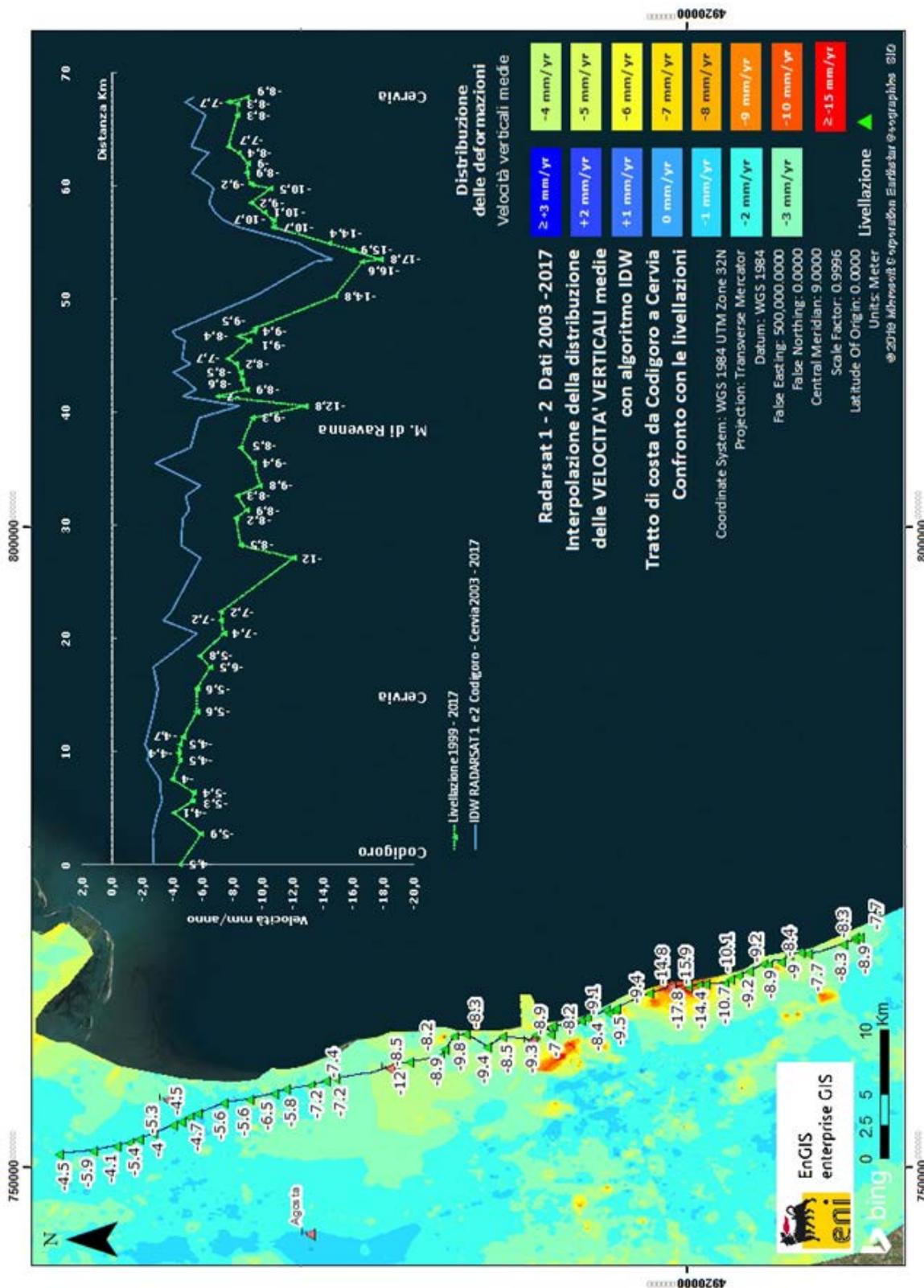
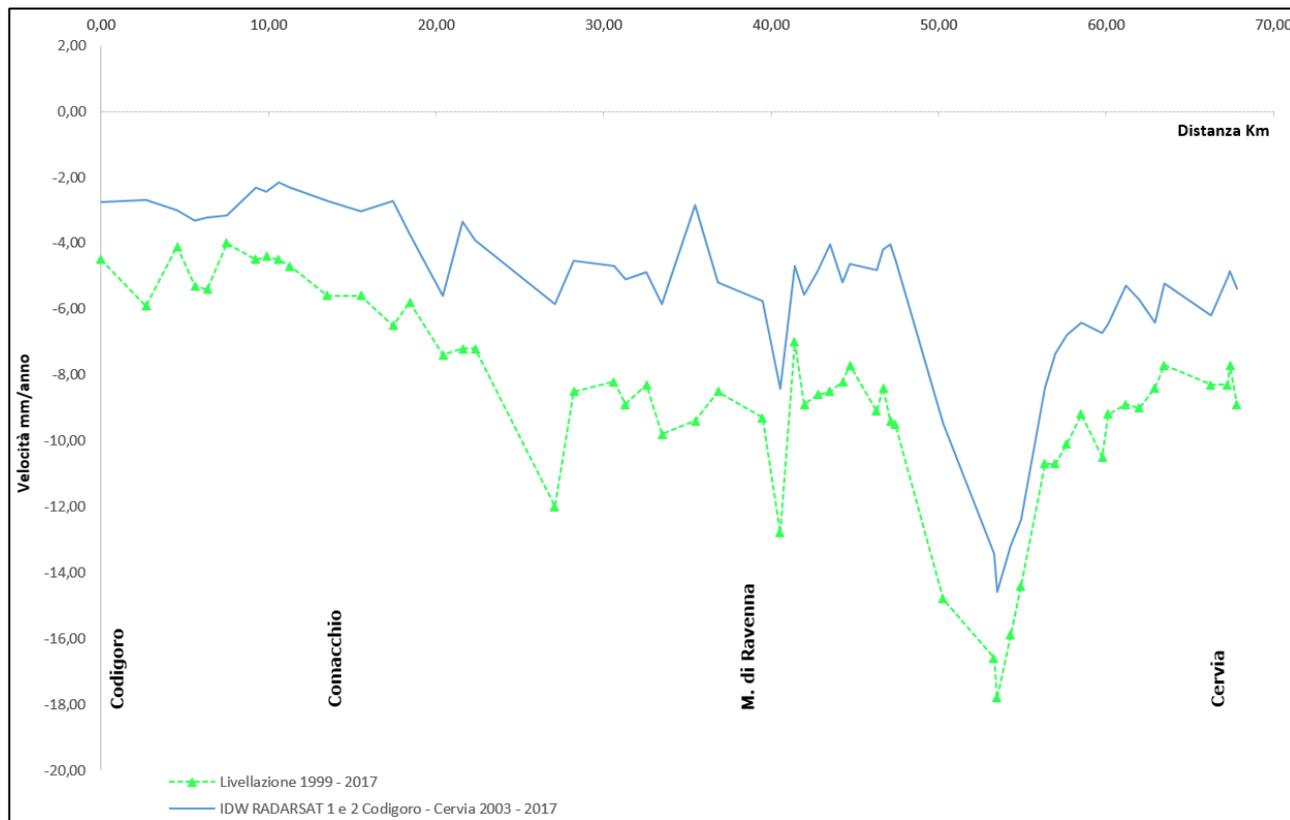


Fig. 4A – Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Codigoro - Cervia



**Fig. 5A - Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Codigoro – Cervia. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**

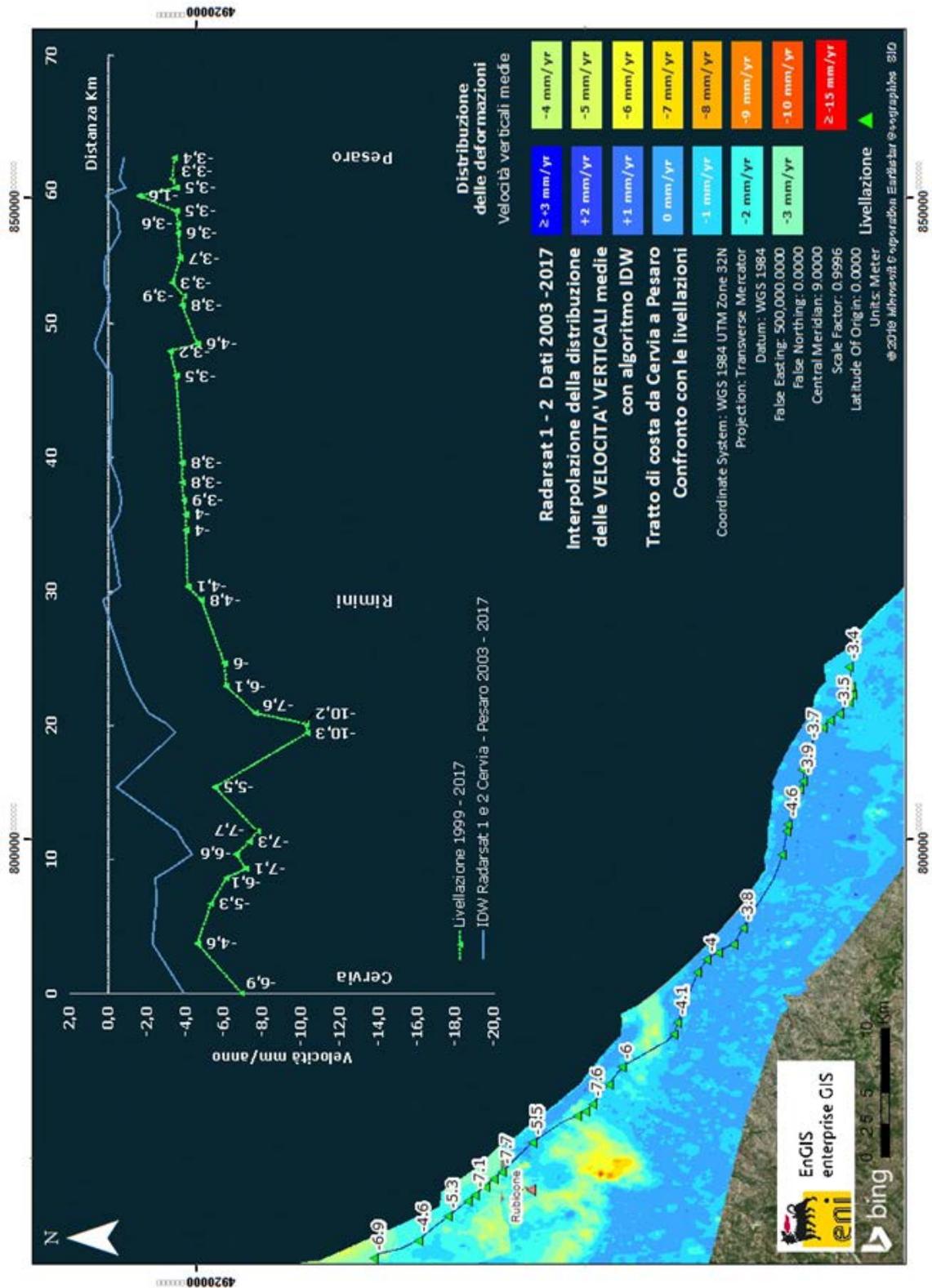
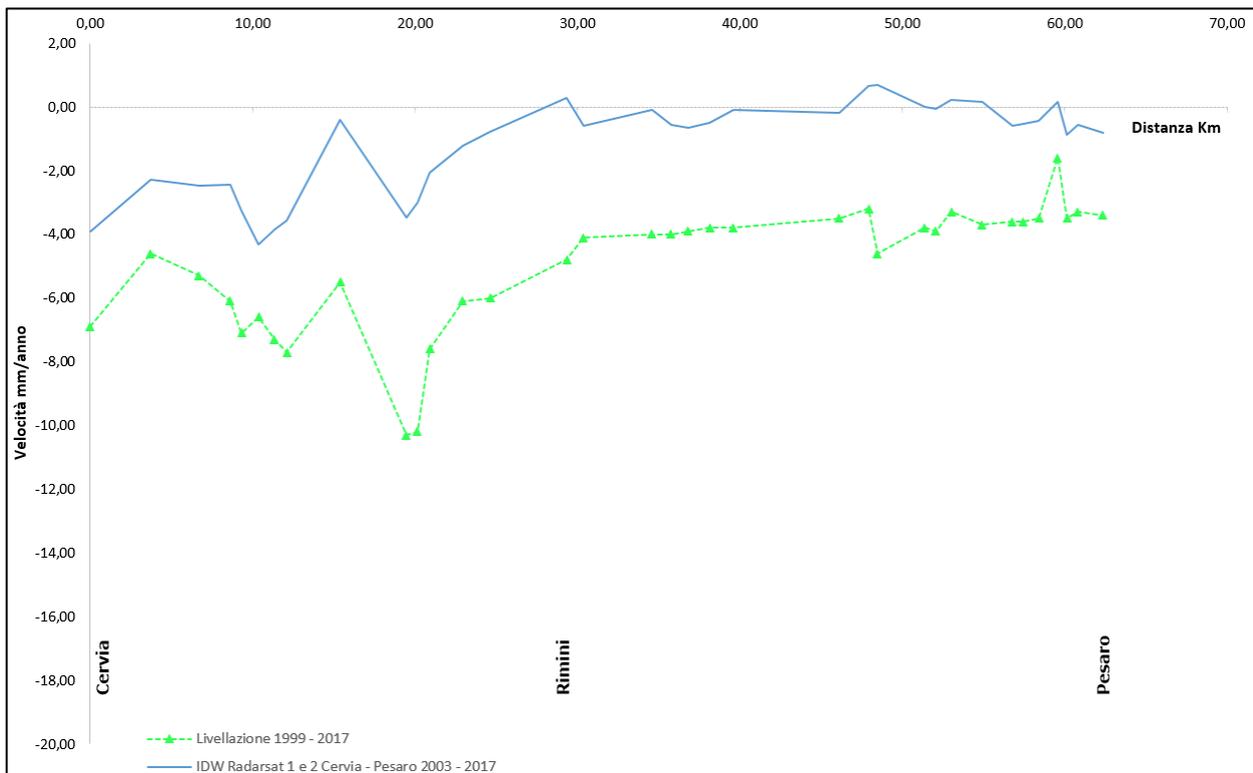


Fig. 6A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Cervia – Pesaro



**Fig. 7A – Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Cervia – Pesaro. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**

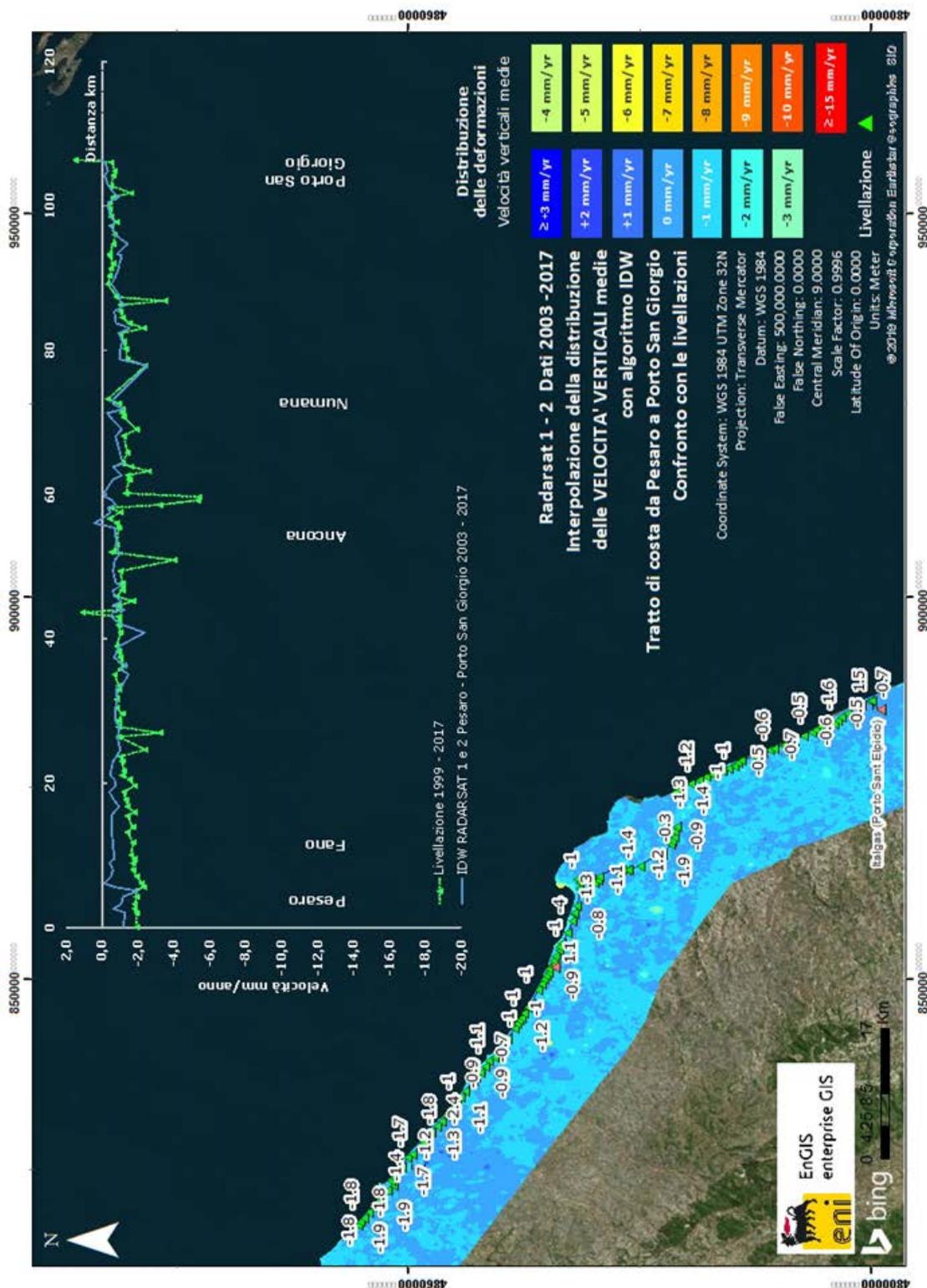
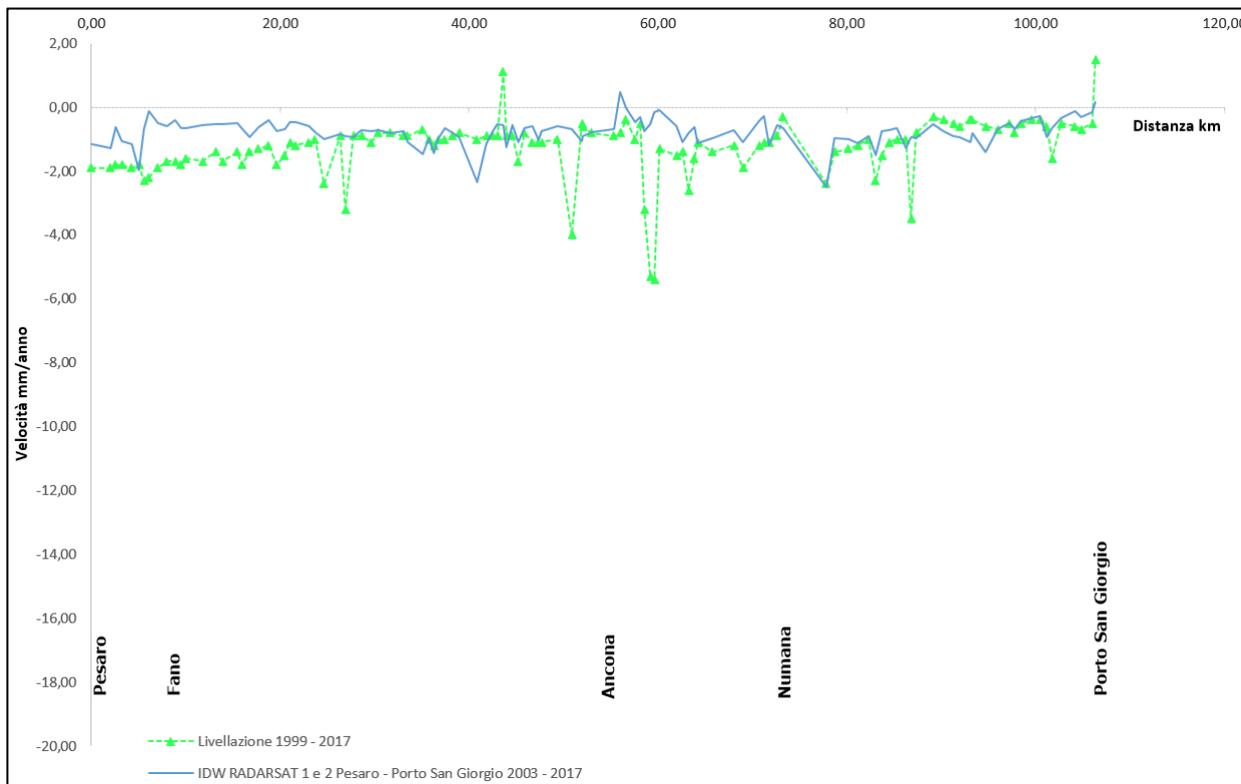


Fig. 8A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Pesaro – Porto San Giorgio



**Fig. 9A - Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Pesaro – Porto San Giorgio. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**



### **Tecnica PSP-DIFSAR (Estratto dalle Linee guida MATTM 2009)<sup>1</sup>**

La tecnologia PSP-DIFSAR sviluppata da Telespazio/e-GEOS (<http://www.telespazio.it> / <http://www.e-geos.it>) è una tecnica d'interferometria differenziale SAR di tipo *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) che utilizza una procedura algoritmica proprietaria per l'individuazione e l'analisi dei *Persistent Scatterers* (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare lenti movimenti del terreno causati da frane, da subsidenza o sollevamento del suolo per estrazione o iniezione di fluidi, da fenomeni vulcanici e sismici, da scavi in sottoterraneo, ecc.

I PS sono bersagli riflettenti le onde radar e costituiti in genere da "oggetti" presenti sul terreno, quali manufatti (ad es., parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici ecc.) ovvero corpi naturali (ad es., rocce esposte), che si distinguono rispetto ad altre strutture dell'area esaminata per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar". Questi "oggetti" hanno caratteristiche riflettometriche tali da consentire misure estremamente accurate della distanza sensore-bersaglio e, quindi, tali da poter rilevare spostamenti anche millimetrici dei PS nel tempo.

L'interferometria differenziale impiega un sensore SAR installato a bordo di un satellite che invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e ne riceve di ritorno il segnale retrodiffuso. Misurando il ritardo di fase tra il segnale inviato e quello retrodiffuso si può determinare con estrema precisione la distanza tra il sensore ed il bersaglio.

Se l'oggetto si trova in una zona interessata da fenomeni di deformazione superficiale, il sensore, investigando con regolarità in tempi successivi la stessa area, ne registra gli eventuali spostamenti. I dati acquisiti, dopo una complessa elaborazione per l'identificazione dei punti di misura e la rimozione dei contributi spuri (ritardi atmosferici, imprecisione nella conoscenza delle orbite, ecc.), rendono possibili valutazioni accurate anche di movimenti superficiali lenti dell'area investigata.

Una delle caratteristiche particolari del metodo PSP è quella di sfruttare solo le proprietà del segnale relative a coppie di punti vicini sia per identificare, sia per analizzare i *Persistent Scatterers*. Infatti, due punti vicini sono affetti allo stesso modo da artefatti atmosferici e or-

---

<sup>1</sup> Le informazioni riportate in questa sezione sono tratte dalla versione 1.0 del rapporto: "Linee Guida per l'Analisi di Dati Interferometrici Satellitari in Aree Soggette a Dissesti Idrogeologici", emesso da **MATTM-Direzione Generale di Difesa del Suolo** nel Dic. 2009 ([www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/](http://www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/)).



bitali, e in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo).

Il metodo PSP presenta le seguenti differenze rispetto alle tecniche PSI standard:

- non richiede calibrazione dei dati o interpolazioni basate su modelli (in particolare per la rimozione degli artefatti atmosferici ed orbitali);
- è meno sensibile alla densità dei PS;
- permette una migliore identificazione di PS in terreni naturali e di PS caratterizzati da movimenti non lineari nel tempo;
- in aggiunta consente procedure di calcolo molto efficienti ed altamente parallelizzabili.

La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone con molta vegetazione o perennemente innevate. L'insieme dei PS sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni CGPS (Continuos Global Positioning System) permanente. La loro densità su scala regionale è però ordini di grandezza superiore a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali, fornendo un quadro d'insieme a costi decisamente più bassi rispetto a queste, dato che il sensore rileva punti di misura che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione trovandosi già sul terreno.

## Appendice B: Stazioni EPSU lungo la fascia costiera compresa tra Cervia e Ancona - aggiornamento a dicembre 2017

Il monitoraggio della compattazione superficiale, lungo la fascia costiera adriatica compresa tra Cervia e Ancona, è effettuato tramite 3 stazioni *EPSU* (*Extensometric Piezometric Survey Unit*) denominate: Rubicone, Fano e Falconara. L'ubicazione di tali stazioni, installate tra il 2008 e il 2009, è riportata in Figura 1B.

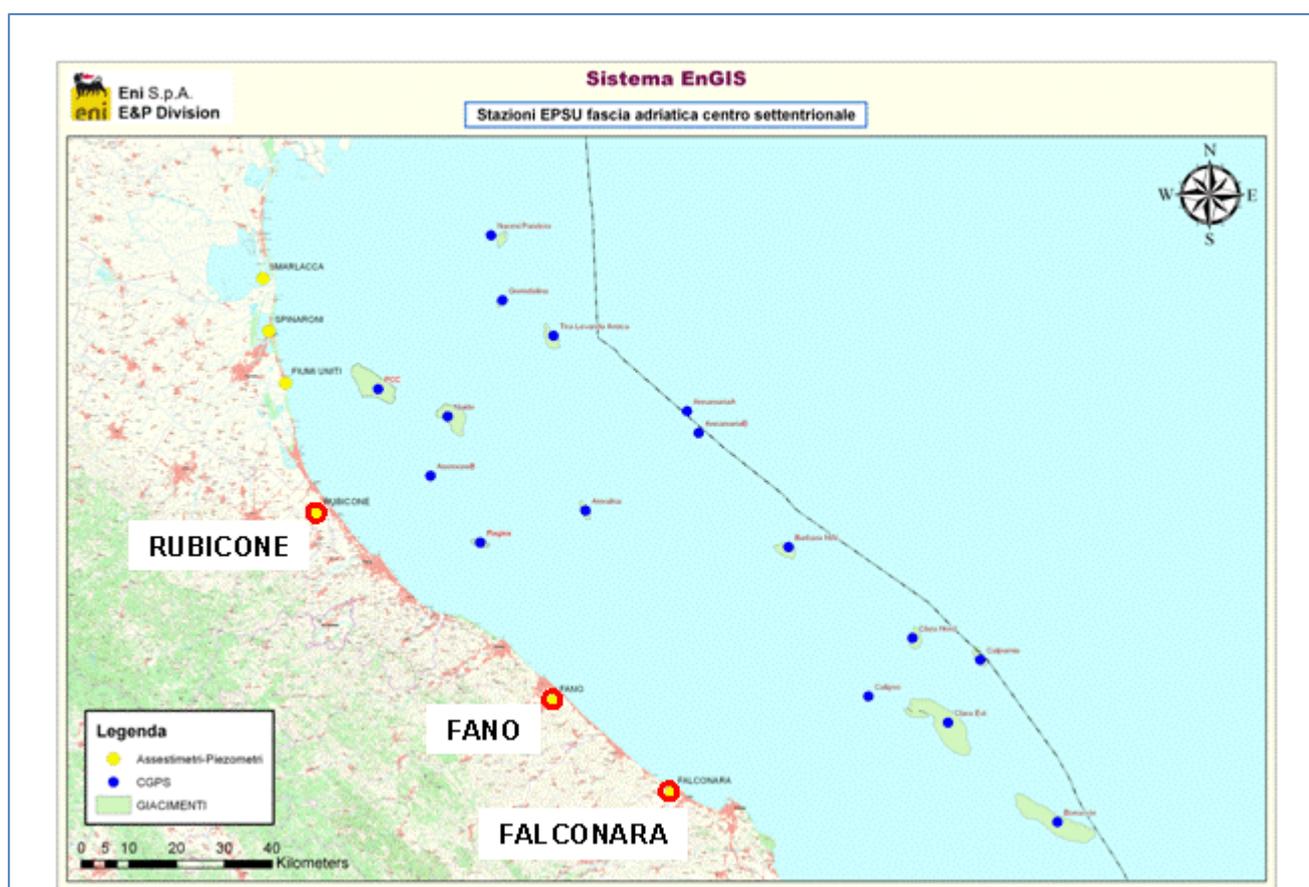


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

In generale una stazione *EPSU* è costituita da un assesimetro, associato a uno o più piezometri, con il corredo di strumentazione meteorologica per la misura della temperatura e della pressione atmosferica (termometri sia in foro che in superficie, e un barometro in modo da compensare le misure assesimetriche per le variazioni della temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in Figura 2B.

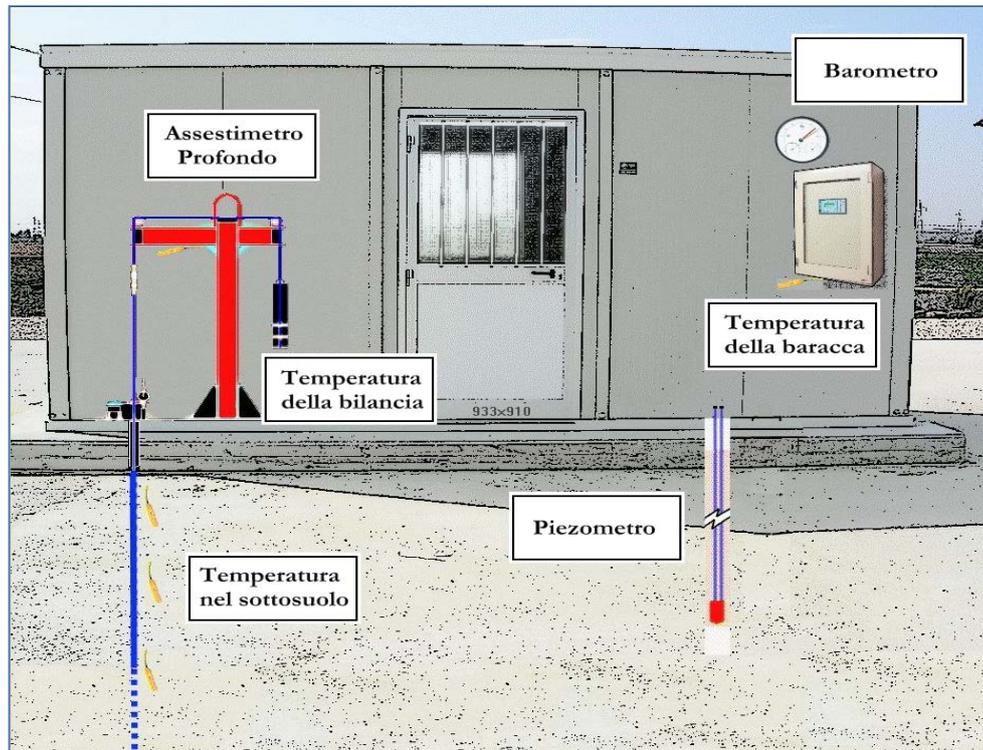


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione *EPSU*

Più in dettaglio, in ciascuna delle 3 stazioni *EPSU* sono stati installati i seguenti dispositivi di misura:

Località	Pozzo	Strumentazione	Profondità (da P.C.)	Data d'installazione
Rubicone	CGRA-1	Assestimetro profondo	320 m	Gen. 2009
	CGRP-1	Piezometro cella singola	178 m	Gen. 2009
	CGRP-2	Piezometro cella doppia	146 m e 70 m	Gen. 2009
Fano	CGFNA-1	Assestimetro superficiale	40,8 m	Lug. 2008
	CGFNP-1	Piezometro superficiale	6,1 m	Lug. 2008
Falconara	CGFLA-1	Assestimetro superficiale	40,3 m	Lug. 2008
	CGFLP-1	Piezometro cella singola	22 m	Lug. 2008



Per ciascuna stazione *EPSU* vengono di seguito presentati:

1. le principali caratteristiche;
2. grafici con tutti i dati registrati.

**N.B.:** *Nella lettura dei dati riportati sui grafici relativi agli assestimetri, i valori positivi costituiscono la componente della compattazione (riduzione dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro); al contrario i valori negativi costituiscono la componente dell'espansione (aumento dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro).*



## **Stazione *EPSU* di RUBICONE (installata dicembre 2009)**

### **Strumentazione:**

- assestometro - quota bottom: 320 m da p.c.
- piezometro singolo - quota cella: 178 m da p.c.
- piezometro doppio - quota celle: 146 e 70 m da p.c.

La strumentazione messa in opera nella stazione è illustrata schematicamente dalle Figure 3B e 4B, mentre la Figura 5B presenta in dettaglio la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto piezometrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°09' 6.76"N e 12° 24' 36.37"E.

La raccolta dati di questa stazione è iniziata l'8 aprile 2009. A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto lo "zero" dei sensori di misura.

I dati sono stati acquisiti con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 08 aprile 2009 - 22 maggio 2009: una misura ogni ora;
- 22 maggio 2009 - 2 novembre 2009: una misura ogni 2 ore;
- dal 02 novembre 2009: una misura ogni 6 ore.

Le misure sono state fatte con alimentazione a batteria fino al 22 maggio 2009. Da tale data fino al 14 luglio 2009 non si hanno registrazioni a causa dei lavori di messa a norma della baracca secondo la normativa ATEX. Dal 14 luglio è ripreso il normale ciclo di funzionamento della stazione. Nel 2011 c'è da segnalare un blackout dei dati per mancanza di alimentazione dell'apparecchiatura tra il 29 settembre e il 14 ottobre.

L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta nel dicembre 2017. Sempre a dicembre è stata effettuata una attività di manutenzione straordinaria di spurgo e lavaggio dei tre piezometri della stazione.

Per i due piezometri ubicati sulla stessa verticale - quello superficiale e l'intermedio (70 e 146 m da p.c.) - il lavaggio con acqua in pressione ha consentito di escludere che vi sia comunicazione idraulica fra gli stessi. Le celle e i tubi di tutti e tre i piezometri (tipo Casa-



grande) sono risultati perfettamente integri: le letture manuali effettuate subito dopo lo spurgo e durante la fase di ricarica della falda sono risultate attendibili, presentando per tutti i piezometri un dislivello massimo tra i due tubi compreso tra 0 e 1 cm. Tutti i piezometri revisionati sono risultati integri e attendibili al fine della restituzione dati.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra il piano campagna (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (320 m da p.c.).

Nei grafici allegati (Figura 6B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella dell'8 aprile 2009, data di collaudo del sistema. I valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione, quelli negativi, viceversa, un incremento dello spessore (cioè espansione) degli strati di terreno monitorati.

Nel caso della stazione di Rubicone, l'andamento nel tempo della curva di compattazione/espansione registrata dall'assestimetro si correla molto bene con le variazioni di livello dell'acqua nelle tre falde monitorate dai piezometri rispettivamente a 70 m, 146 m e 178 m di profondità. Per tutto il periodo osservato si nota, infatti, un ritardo medio di circa 1,5÷2 mesi nella espansione/compattazione del terreno rispetto all'escursione massima (marzo/aprile) e minima (agosto/settembre) dei livelli di tali falde.

Nella stessa area della stazione assestimetrica è installata anche una postazione CGPS. Ciò ha permesso un confronto fra la velocità media d'abbassamento del suolo rilevata dai dati CGPS con quella di compattazione del terreno ottenuta dalle misure assestimetriche (Figura 7B). Tali velocità, che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, sono risultate in sostanziale accordo, soprattutto a partire dal 2012. La velocità media annua calcolata con regressione lineare della serie storica di misure CGPS è di -2,1 mm/a, abbastanza prossima a quella ottenuta in modo analogo dalle misure assestimetriche che è pari a -2,7 mm/a. Ciò potrebbe indicare che la causa principale d'abbassamento del suolo dipenda principalmente dalla compattazione dei primi 320 m di terreno e sia indot-



ta dalle oscillazioni stagionali delle falde acquifere e/o dal loro emungimento.

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico:

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

### **Analisi dei dati piezometrici**

Nei grafici dei piezometri (Figura 6B) l'ordinata è la quota piezometrica (m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

Nel caso di Rubicone si notano delle effervescenze gassose nei tubi piezometrici causate dalla presenza di piccole quantità di gas nell'acqua; il fenomeno del resto era già osservato durante le operazioni di messa in opera dell'attrezzatura. Queste piccole effervescenze causano differenze di misura dei livelli d'acqua nei due tubi del piezometro profondo (pozzo CGRP-1).

Nel mese di ottobre 2012 si sono puliti e controllati i 3 piezometri verificando il loro buon funzionamento.

Un nuovo spurgo è stato fatto a fine settembre 2014 e si può osservare dai grafici dei piezometri, soprattutto per la curva relativa a quello superficiale, che a partire da tale data si è modificata la dinamica dell'escursione del livello dell'acqua.

A dicembre 2017, come già detto, è stata fatta una manutenzione straordinaria con spurgo e lavaggio dei tre piezometri. Sono stati controllati anche tutti i trasduttori di pressione. L'affidabilità di questi ultimi, in particolare, è stata accertata facendo diverse misure manuali con freatometro. Queste sono risultate del tutto in linea con le misure automatiche, consentendo di concludere che tutti i trasduttori erano perfettamente funzionanti e affidabili. Nella stessa occasione sono state fatte misure di fondo foro.

Tutti i piezometri e relativi trasduttori sono, quindi, risultati integri e in grado di fornire dati attendibili.

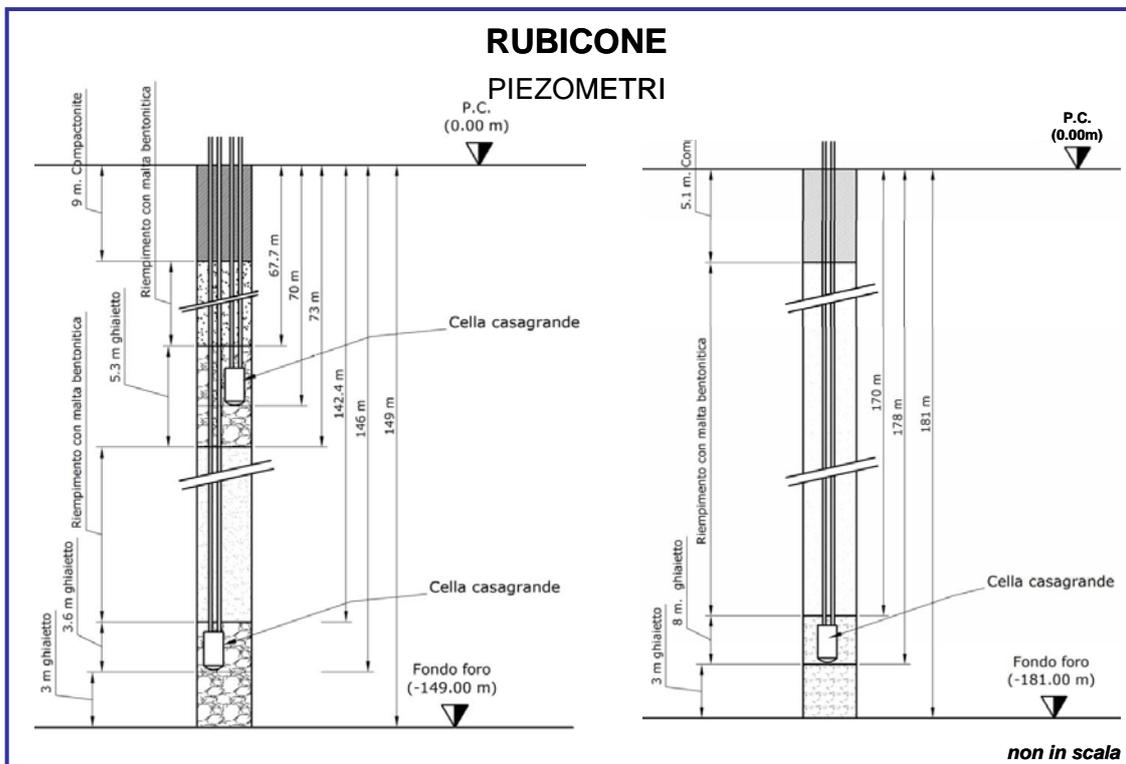


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

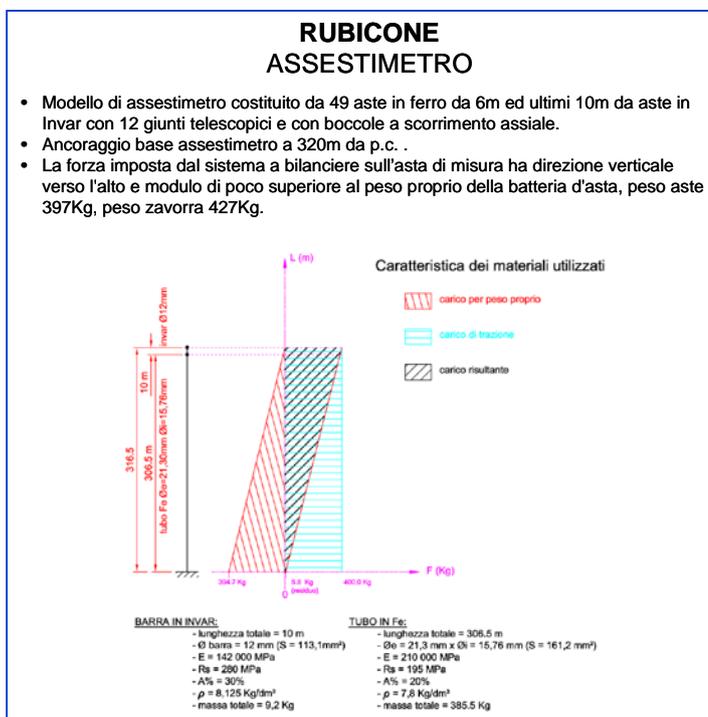


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

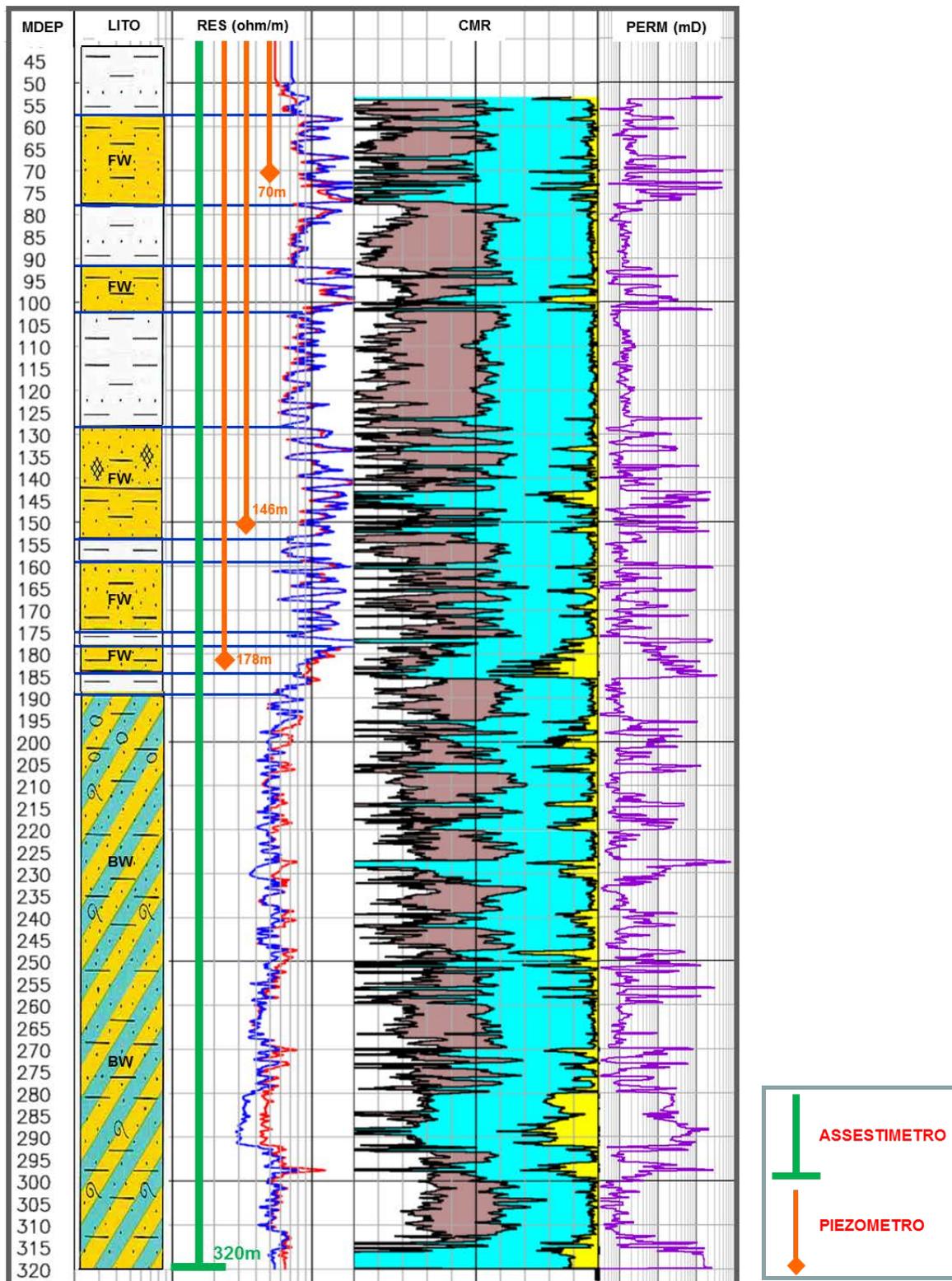


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

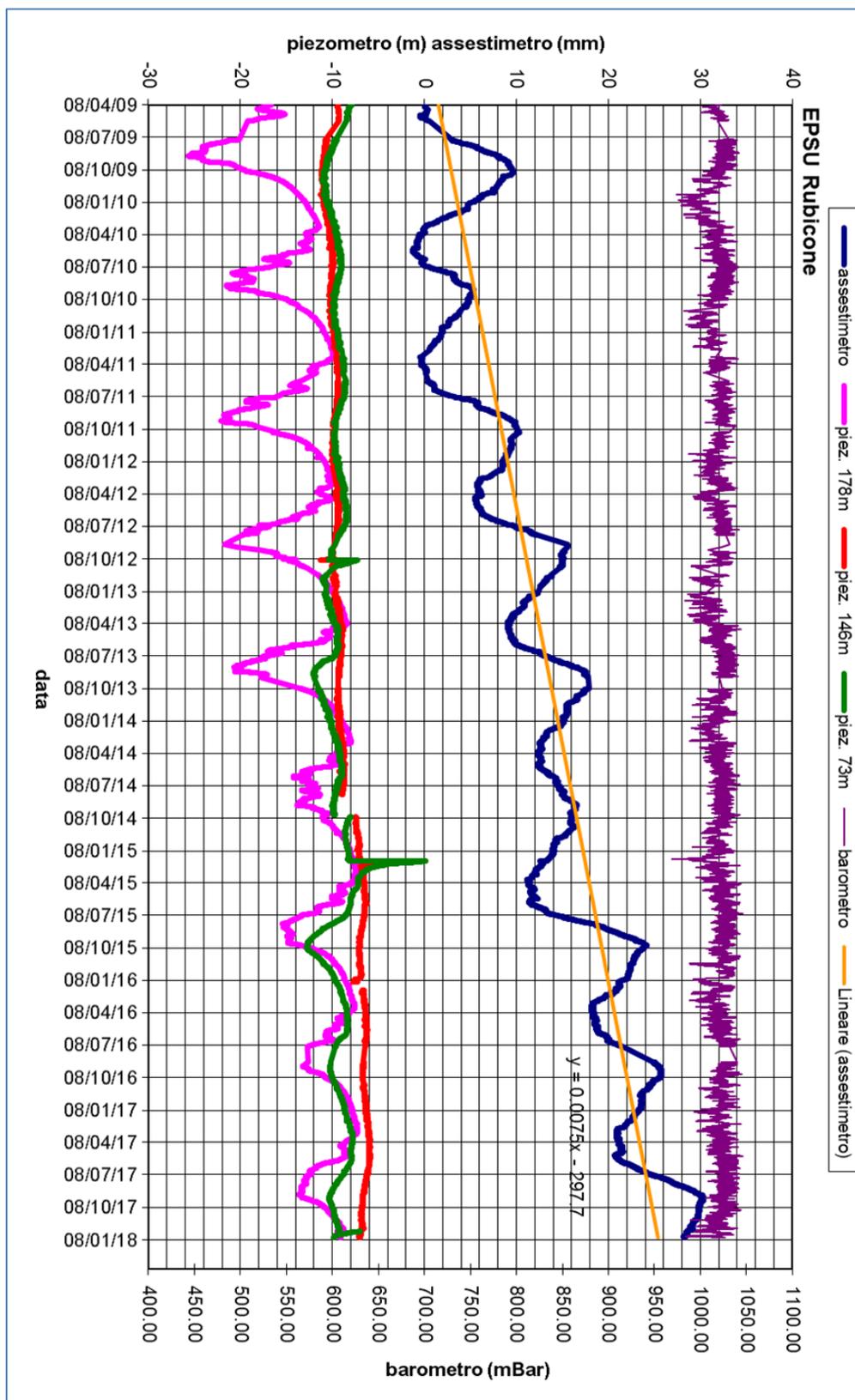
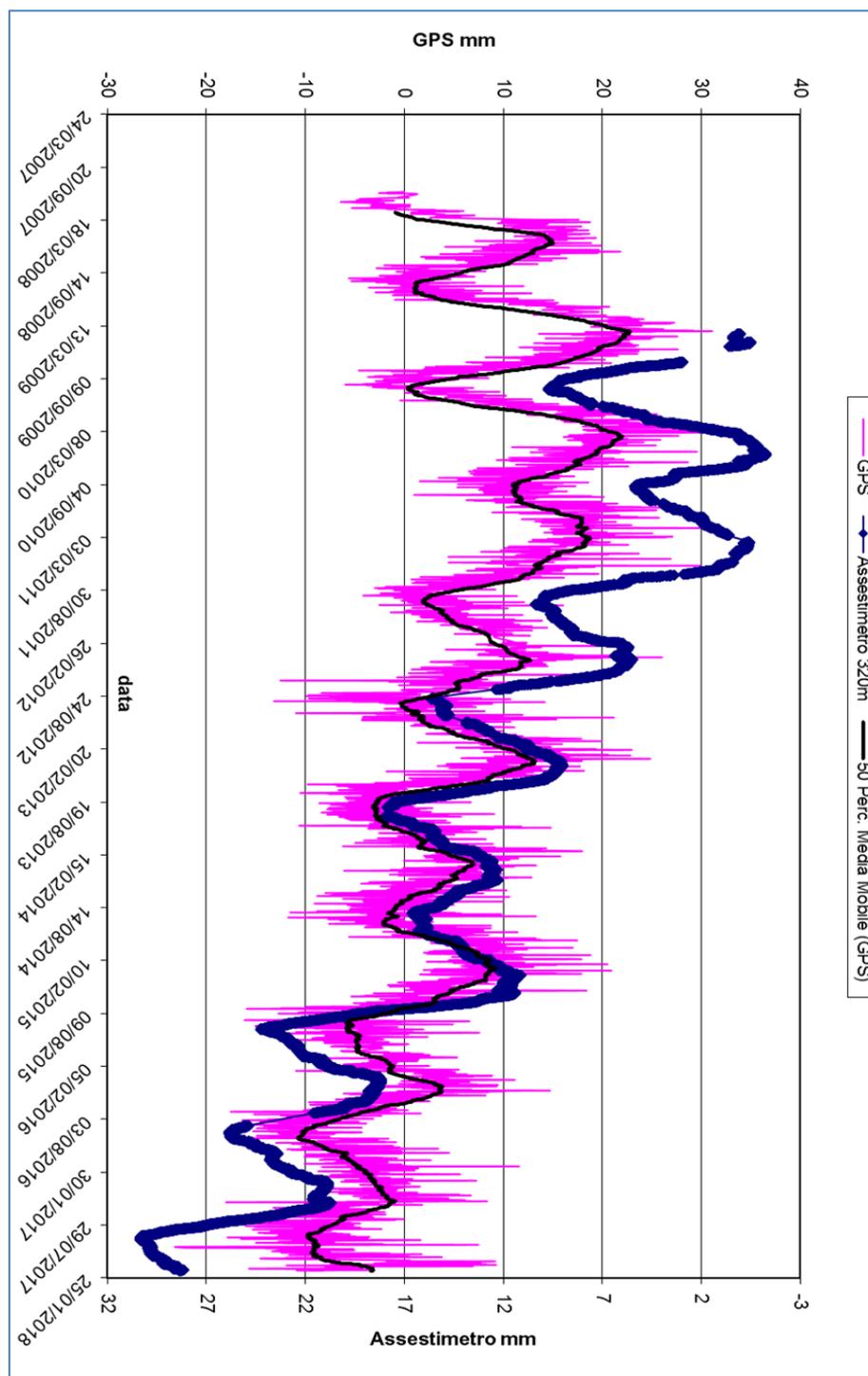


Figura 6B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestometriche dal 2008 al 2018 inclusi i dati barometrici



**Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto misure CGPS vs. misure assestimentriche**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimentrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).*



## **Stazione *EPSU* di FANO (installata ottobre 2008)**

### **Strumentazione:**

- assestometro - quota bottom: 40,8 m da p.c.
- piezometro a cella singola: quota cella 6,1 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 8B, mentre la Figura 9B riporta la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 43° 48' 28.37"N e 13° 02' 25.78"E.

La raccolta dati di questa stazione è iniziata il 16 ottobre 2008. A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" per tutti i sensori di misura.

L'acquisizione dati è stata fatta con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 16 ottobre 2008 - 18 maggio 2009 una misura ogni ora;
- 19 maggio 2009 - 31 dicembre 2016 una misura ogni 6 ore.

Nel periodo monitorato (10/2008 – 12/2017) non si sono notate anomalie né a livello sensoristico, né a livello di apparecchiatura d'acquisizione dati.

L'ultimo controllo generale della strumentazione, con misure manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stato fatto nel dicembre 2017.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestometro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra la superficie (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (40,8 m da p.c.).

Nei grafici allegati (Figura 10B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestometro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. I valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Sin dall'inizio della sua installazione, lo strumento non ha mai fatto registrare significative



variazioni di spessore (compattazioni o espansioni) della porzione di terreno monitorato. Le escursioni cicliche stagionali, infatti, sono dell'ordine di  $\pm 1$  mm, con una punta massima di compattazione di circa 1,5 mm registrata all'inizio del 2012.

La curva assestimetrica, inoltre, si correla bene con l'andamento del livello della falda acquifera monitorata dal piezometro posto a circa 6 m dal piano campagna, anche se con uno sfasamento temporale (ritardo dell'assestimetro rispetto ai minimi piezometrici) di qualche mese. Si osservano, infatti, quasi regolarmente i massimi di compattazione all'incirca a metà gennaio di ogni anno, mentre invece i minimi livelli della falda acquifera si verificano, quasi sempre, circa quattro mesi prima, ovvero intorno a metà settembre.

Nel corso del 2017 si è assistito a un ciclo simile agli anni precedenti, senza significative variazioni; una compattazione di circa 1 mm a inizio anno (metà gennaio) è stata quasi del tutto recuperata da una successiva espansione estiva (metà luglio), per ritornare poi a un valore di circa 1 mm (compattazione) nel periodo autunno-invernale.

Per tutto il 2017 l'assestimetro registra, quindi, una compattazione complessiva di ca. 1 mm. Se si prendono in esame tutti le misure assestimetriche registrate nei nove anni di osservazioni in questa stazione, queste ultime mostrano, analogamente a quelle di Falconara, una situazione del terreno sostanzialmente stabile, con una compattazione complessiva pressoché nulla, a parte le variazioni cicliche stagionali.

Un comportamento del terreno pressoché identico è registrato dal CGPS ubicato in prossimità della stazione *EPSU*. Le misure CGPS danno, infatti, la superficie del suolo in leggero innalzamento con velocità media di ca. 0,6 mm/a. A sua volta la velocità media di compattazione stimata con regressione lineare dei dati della serie assestimetrica è praticamente nulla (0,003 mm/a).

L'esame comparato delle due serie di misure (assestimetriche e geodetiche CGPS - Figura 11B) mostra come queste abbiano gli stessi andamenti oscillatori ma sfasati nel tempo. In particolare, la curva assestimetrica sembra essere ritardata di ca. 4-5 mesi rispetto a quella geodetica. È bene osservare, però, che si tratta di movimenti del suolo di bassissima entità, per cui si è al limite del potere risolutivo delle due tecniche di misura.

Passando al confronto con la piezometria, si nota che entrambe le curve - assestimetrica e geodetica CGPS - mostrano una buona correlazione con gli andamenti stagionali della fal-



da. La curva assestimetrica si presenta, però, sfasata anche rispetto a quella piezometrica, raggiungendo il minimo (massima espansione) circa tre/quattro mesi dopo il massimo del livello piezometrico. Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal ritardo con cui si contrae o rigonfia un grosso strato d'argilla (ca. 32 m) quando varia la sua saturazione in acqua. La presenza di tale strato d'argilla è stata rilevata durante la perforazione del foro assestimetrico.

La curva dei dati CGPS sembra invece più in fase nel registrare in superficie i movimenti d'espansione e contrazione degli strati di terreno causati dalle variazioni del livello d'acqua nella falda. Va però notato che l'ubicazione dell'antenna CGPS (stazione *SSU*) dista circa 150-200 m dalla stazione *EPSU*, e probabilmente il terreno su cui è stata installata ha una stratigrafia caratterizzata da una minore presenza di livelli argillosi.

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 11B):

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

## **Analisi dei dati piezometrici**

Nello stesso grafico (Figura 10B) dei dati assestimetrici si è riportata la piezometria.

Nel grafico del piezometro l'ordinata è la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

L'installazione di due trasduttori di pressione, uno per ogni canna del piezometro Casa-grande, rende possibile controllare il grado di affidabilità del piezometro stesso. In questo caso la differenza di misura tra i due sensori è stata di circa  $\pm 8$  cm, il che rientra nella normale tolleranza dello strumento.

L'ultimo controllo generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stato fatto nel dicembre 2017.

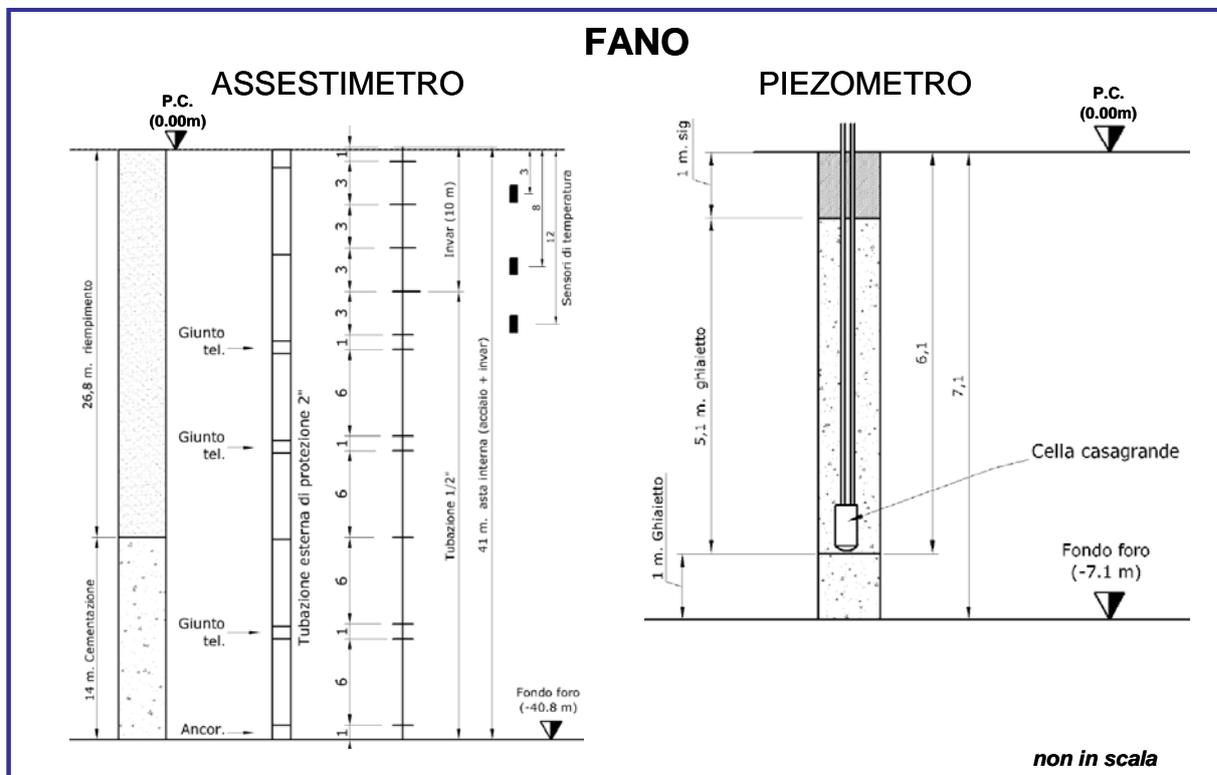
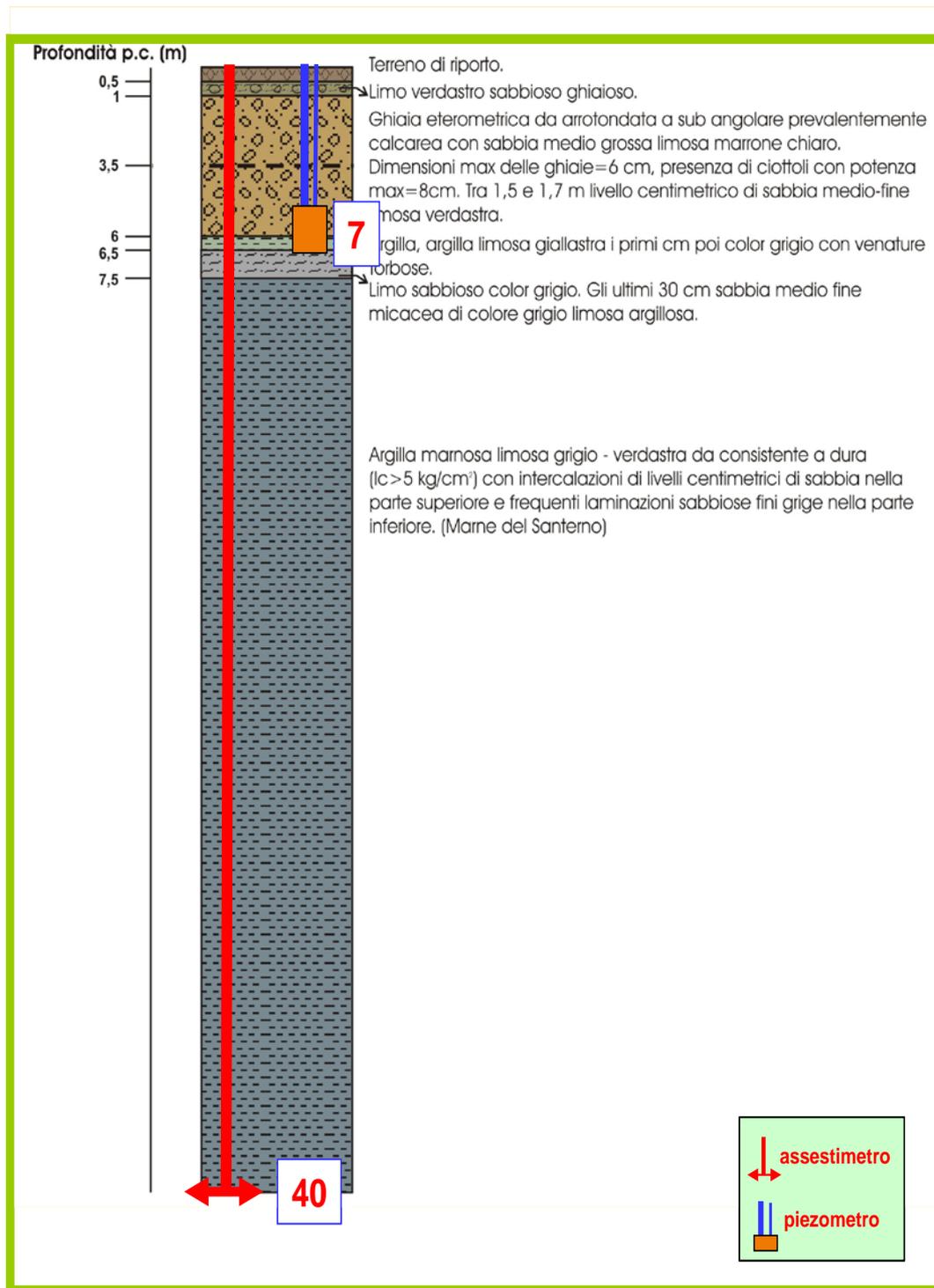


Figura 8B - Schema della stazione EPSU di Fano

Figura 9B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione *EPSU* di Fano

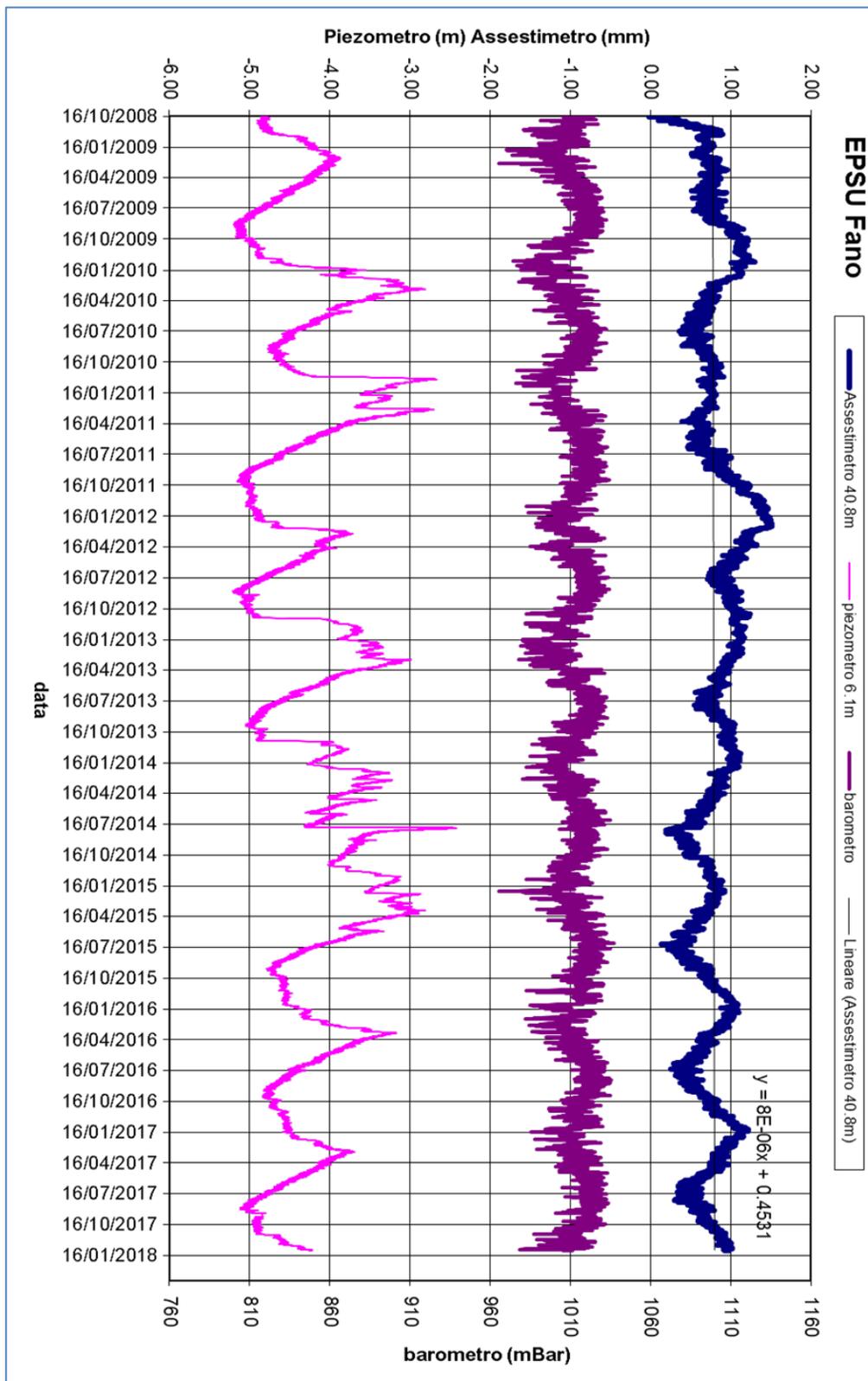
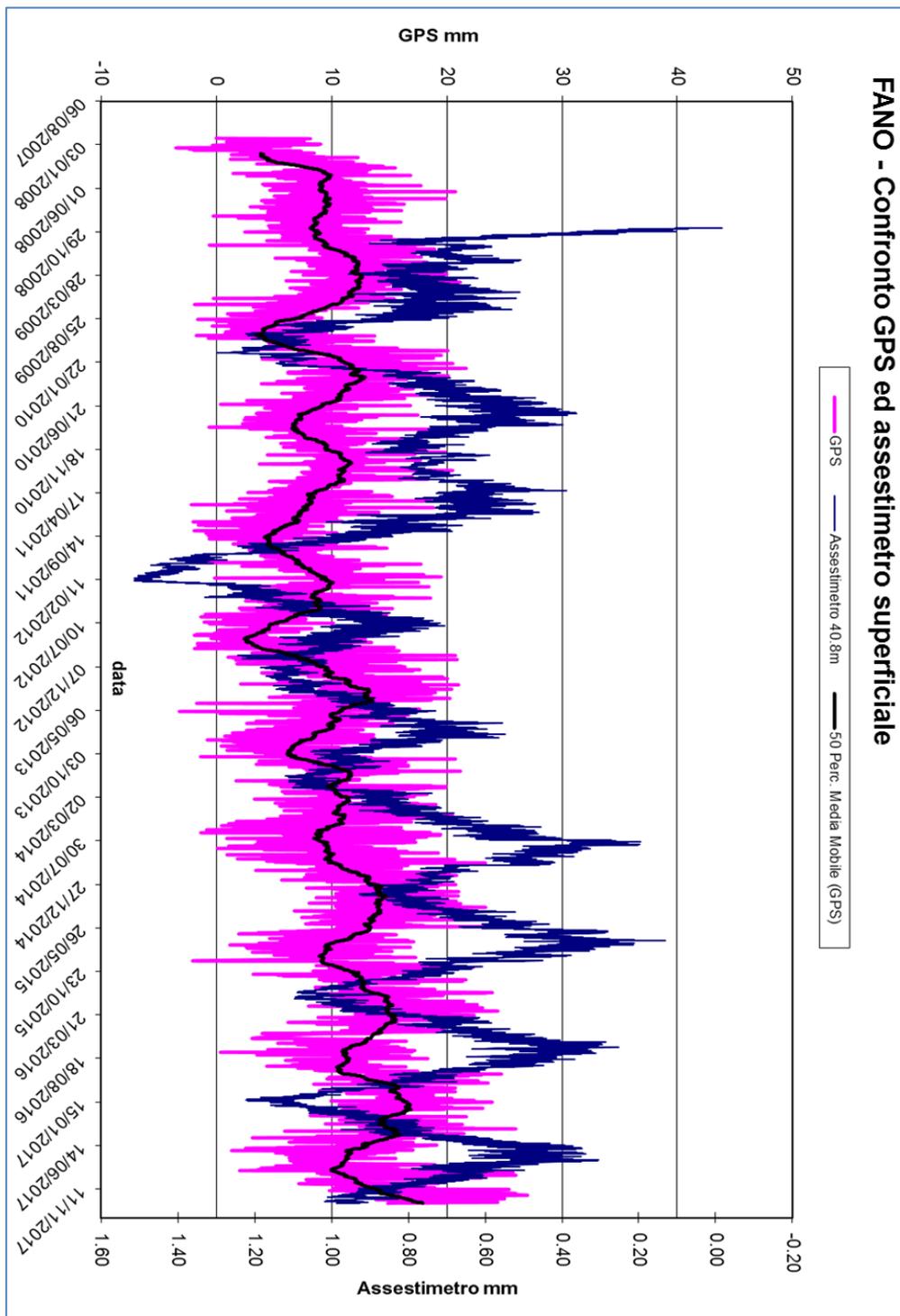


Figura 10B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018



**Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: confronto fra misure CGPS vs. misure assestimetriche**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).*



## **Stazione EPSU di FALCONARA (installata ottobre 2008)**

### **Strumentazione:**

- assestometro - quota bottom: 40,3 m da p.c.
- piezometro a cella singola – quota cella: 21 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 12B, mentre la Figura 13B riporta la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 43° 38' 28.86"N e 13° 21' 23.69"E.

La raccolta dati di questa stazione è iniziata il 16 ottobre 2008. A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto lo “zero” dei sensori di misura.

L'acquisizione dati è stata fatta con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 16 ottobre 2008 -18 maggio 2009: una misura ogni ora;
- 08 maggio 2009 - 31 dicembre 2014: una misura ogni 6 ore.

Nei periodi 07 ottobre 2011- 02 novembre 2011 e 03 dicembre - 13 dicembre 2011 si è avuto un problema d'alimentazione all'apparecchiatura d'acquisizione automatica dei dati, con conseguente mancata registrazione degli stessi. Identico problema si è verificato tra febbraio e aprile 2012; si è perciò sostituito parte dell'hardware del sistema d'acquisizione.

L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stata effettuata nel dicembre 2017.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestometro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra il piano di campagna (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (40,3 m da p.c.).

Nei grafici allegati sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici (Figura 14B). I dati relativi all'assestometro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale (“misura di zero”). Tale misura è quella del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremen-



to dello spessore (*i.e.*: espansione) degli strati di terreno monitorati.

Come nel caso della stazione di Rubicone, anche per quella di Falconara la variazione nel tempo delle misure assestometriche è caratterizzata da una curva ad andamento oscillatorio molto ben correlabile con le variazioni di livello della falda d'acqua monitorate a 22 metri di profondità, dal piezometro.

L'assestometro, che reagisce quasi immediatamente, senza ritardi, all'escursione massima e minima annuale di tale falda, mostra, inoltre, uno stato del terreno assolutamente stabile nel tempo, cioè senza apprezzabile compattazione. La velocità media annua calcolata con regressione lineare delle misure assestometriche risulta, infatti, pari a ca. -0,1 mm/a (ovvero minima espansione dello spessore di terreno monitorato).

Identico andamento emerge dall'analisi delle misure di abbassamento/sollevamento del suolo della stazione CGPS installata in loco. La correlazione tra le due curve, assestometrica e geodetica (Figura 15B), è estremamente elevata, il loro sfasamento temporale è pressoché nullo e le "pulsazioni" (espansioni e compattazioni) del terreno (tutte di piccolissima entità) sono correlate alle variazioni di livello della falda acquifera.

La velocità media annua calcolata con una regressione lineare dei dati CGPS risulta pari a +0,2 mm/a (ovvero leggerissimo sollevamento della superficie del suolo).

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 15B):

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestometrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

### **Analisi dei dati piezometrici**

Il grafico di Figura 14B oltre ai dati assestometrici riporta in ordinate sia la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna, sia il valore della pressione barometrica.

Nel caso di Falconara il livello della falda è risultato molto alto, circa 1,3 m da p.c. Dato che si sono utilizzati 2 trasduttori di pressione - uno per ogni canna del piezometro Casagrande



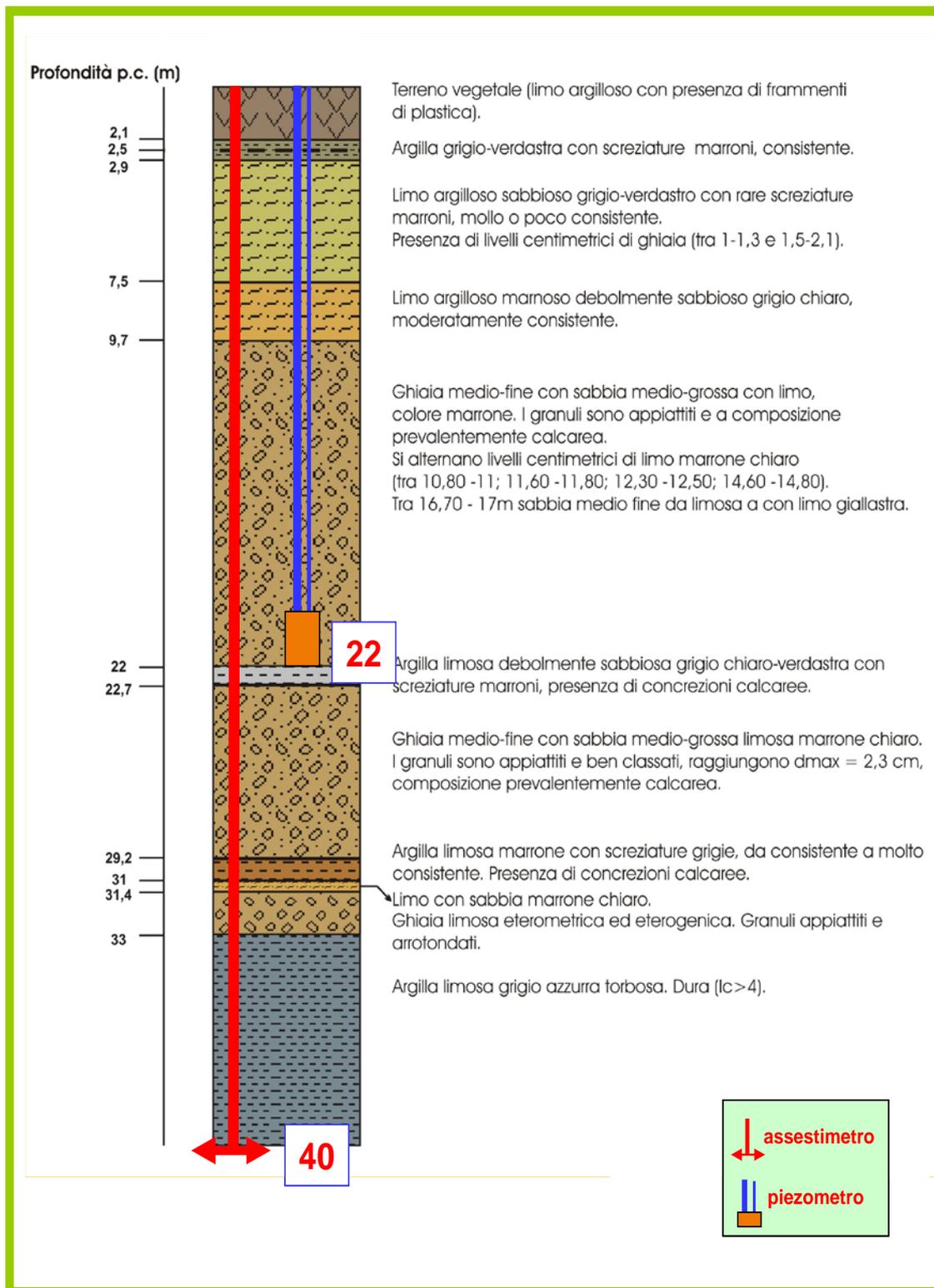


Figura 13B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

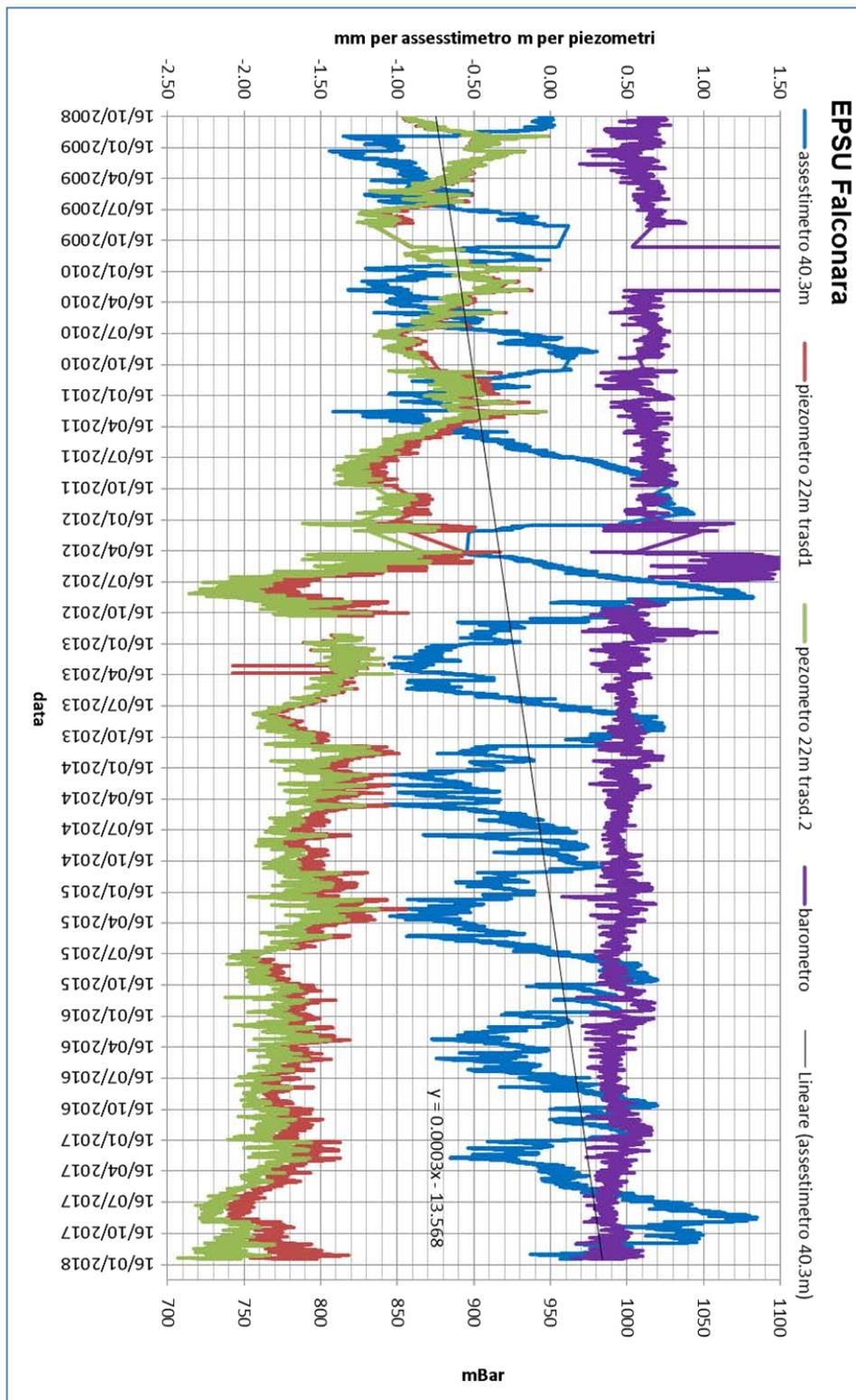


Figura 14B - Stazione *EPSU* di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018

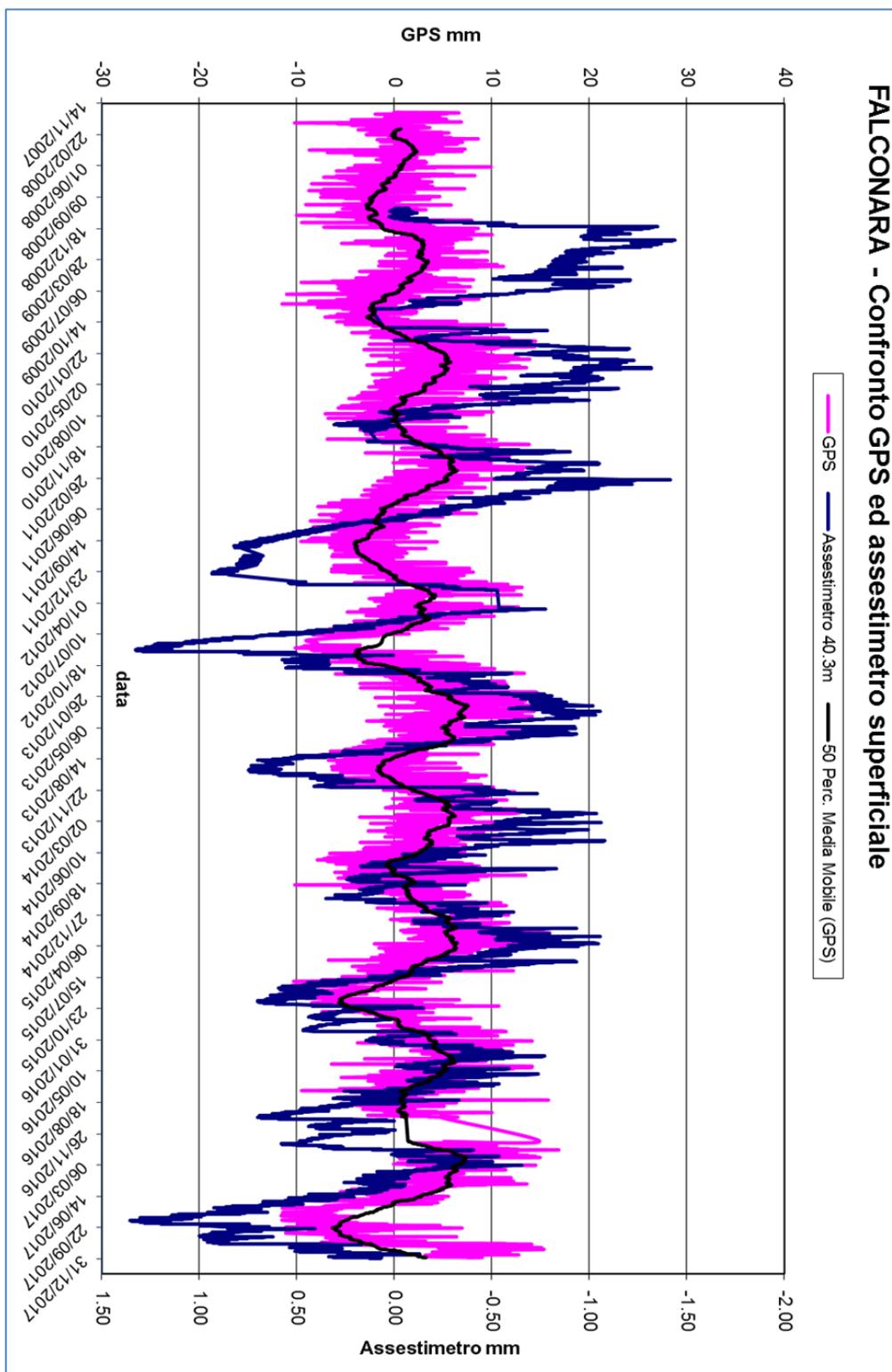


Figura 15B Stazione *EPSU* di Falconara: confronto misure CGPS vs. misure assettimetriche

*N.B.:* nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assettimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).



## Conclusioni

Dall'insieme dei dati sino ad ora raccolti nelle 3 stazioni *EPSU* si nota, in generale, una buona correlazione diretta tra l'andamento stagionale della piezometrica ed i cicli di compattazione ed espansione del terreno misurati dagli assestimetri.

Tale correlazione è più evidente nel caso di Falconara, dove il piezometro monitora le falde superficiali più sensibili a tutte le variazioni stagionali di piovosità.

Anche nel caso di Rubicone c'è un'ottima correlazione tra i cicli stagionali di compattazione/espansione del terreno monitorati dall'assestimetro e le corrispondenti variazioni di livello delle tre falde registrate dai piezometri. Le compattazioni massime, infatti, si hanno all'incirca a settembre/ottobre di ogni anno quando i livelli piezometrici delle falde sono minimi; le espansioni massime si verificano, invece, mediamente verso aprile/maggio di ogni anno e a loro volta sono in buona correlazione con i livelli piezometrici massimi delle stesse falde.

L'assestimetro di questa stazione, essendo il più profondo di quelli installati nelle 3 *EPSU*, è anche quello che registra nel tempo un aumento progressivo della compattazione del terreno monitorato (spessore 320 m). Lo strumento a dicembre 2017, dopo circa 8,73 anni di funzionamento, misurava, infatti, una compattazione complessiva (rispetto allo zero iniziale) di 28,2 mm, che con un semplice calcolo equivale a una velocità media annua di compattazione pari a circa 3,2 mm/a. Tale valore si riduce leggermente a circa 2,7 mm/a se si elaborano i dati delle misure assestimetriche in modo un po' più sofisticato, ad es. con metodi di regressione lineare.

Nel caso di Fano, il trend delle curve piezometrica e assestimetrica è maggiormente influenzato dalla litologia attraversata dai pozzi, litologia che rende meno evidente la correlazione tra andamento stagionale del livello della falda e misure assestimetriche. Infatti, mentre il piezometro monitora le variazioni di livello della falda in uno strato ghiaioso-sabbioso superficiale (max. profondità 6 m dal p.c.), l'assestimetro è ancorato alla base di uno strato argilloso spesso circa 32 m e scarsamente comprimibile: lo strumento, infatti, nei circa 9 e più anni di funzionamento ha misurato una compattazione complessiva quasi nulla.



La tabella che segue riporta per ciascuna stazione la compattazione complessiva del terreno al 31/12/2017 e la relativa velocità media annua, valutata semplicemente come rapporto fra la misura assestimetrica a fine 2017 e gli anni complessivi di monitoraggio. In questo caso non si è fatta alcuna regressione lineare dei valori della serie storica assestimetrica. Questo procedimento potrebbe, pertanto, dare risultati non perfettamente uguali, anche se molto simili, a quelli riportati nelle precedenti analisi dei dati assestimetrici.

Si noti, altresì, che per le stazioni di Fano e Falconara le misure assestimetriche hanno valori molto piccoli, e che nel periodo d'osservazione non è emerso un trend ben definito di compattazione del terreno. In questo caso le medie annuali non si possono considerare veramente significative.

Sito	Anni di osservazione	Assestimetro profondo		Assestimetro superficiale	
		Spostamento compl. (mm)	Velocità (mm/a)	Spostamento compl. (mm)	Velocità (mm/a)
<b>Rubicone</b>	8,73	28,2	3,2	n.i.	n.i.
<b>Fano</b>	9,21	n.i.	n.i.	0,9	n.v.
<b>Falconara</b>	9,21	n.i.	n.i.	0,1	n.v.

n.i. = non installato

n.v. = non valutabile