

## Campo di BONACCIA

Aggiornamento al 31/12/2017

Il campo di Bonaccia è ubicato nell'offshore adriatico in prossimità della linea mediana a 60 km dalla costa, a Est del promontorio del Monte Conero. Il fondale marino in tale zona è di circa 87 metri. Il campo ricade nella concessione B.C17.TO (scadenza il 18/10/2028) inizialmente rilasciata alla joint venture TMF (Total operatore, Merloni, Foster Wheeler), acquisita poi interamente da Eni nel 1997 (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
B.C17.TO	18/10/28	Eni	Eni	100%	Marche

Da un punto di vista geologico l'area di Bonaccia-Bonaccia Est si trova sul margine più esterno del bacino di avanfossa appenninica Plio-Pleistocenico che ricopre la parte più esterna della rampa di avanpaese. L'elemento tettonico principale è il fronte del *thrust* Dinamico, con orientazione NW-SE, di età tardo Cretacica-Eocenica. I livelli mineralizzati a gas sono stati rinvenuti a una profondità compresa tra 750 e 1060 m slm e appartengono alla formazione Carola, costituita da depositi torbiditici di età Pleistocenica, in particolare dalle sequenze stratigrafiche denominate PLQ1 e PLQ (Figura 2). La struttura del giacimento è rappresentata da tre culminazioni: la zona centrale, interessata dallo sviluppo dei pozzi della p.ma Bonaccia; la parte orientale che è stata confermata da pozzi Bonaccia Est 1, Est 2dir ed Est 3dir e la parte occidentale, oggetto dello sviluppo del campo del 2015.

Il giacimento è stato scoperto nel periodo 1981-1985 con la perforazione da parte di Total del pozzo esplorativo Bonaccia 1. I successivi tre pozzi *appraisal* (Bonaccia 2, 3 e 4) hanno confermato la mineralizzazione e delineato l'estensione del campo. Il pozzo Bonaccia Sud 1, perforato nel 1981 per verificare l'estensione della struttura nella zona a SE, è risultato sterile. Nel 2002 è stato perforato il pozzo esplorativo Bonaccia Est 1 che ha invece confermato l'estensione della mineralizzazione sulla culminazione della struttura di Bonaccia Est. I livelli mineralizzati di Bonaccia Est sono parzialmente separati da quelli di Bonaccia sia a causa di una sella fra le 2 strutture, sia per la presenza di "*slump*" o altro tipo di barriera non rilevabile dall'interpretazione sismica.

Il campo di Bonaccia è stato sviluppato da Eni tra il dicembre del 1997 e aprile del 1998 con la perforazione da piattaforma fissa di sette pozzi completati con *string* doppia ed equipaggiati con dispositivi di “*sand control-ICGP*” (*Inside Casing Gravel Pack*) per complessive 14 stringhe produttive. La produzione di gas è stata avviata nel febbraio del 1999; attualmente solo 8 stringhe sono in erogazione. Nel 2007 sono stati fatti alcuni interventi per migliorare il recupero di gas dal giacimento perforando dalla piattaforma Bonaccia un nuovo pozzo di *in-filling* (Bonaccia 12dir) e facendo un *side-track* del pozzo Bonaccia 11dir.

La culminazione di Bonaccia Est è stata sviluppata nel 2010 con la perforazione dei due pozzi Bonaccia Est 2dir e Bonaccia Est 3dir. Questi ultimi, equipaggiati con croci di produzione sottomarine e collegati all’esistente piattaforma Bonaccia mediante un nuovo *sealine* da 6”, sono stati posti in produzione nell’ottobre 2010.

Quanto al processo autorizzativo, Eni ha presentato, in data 31/08/05, un’istanza di variazione programma lavori finalizzata al recupero incrementale di riserve certe di gas nell’ambito della concessione di coltivazione idrocarburi B.C17.TO. Nel corso del procedimento, dopo aver fornito integrazioni di progetto al Ministero dello Sviluppo Economico (UNMIG Bologna), Eni ha depositato il SIA per la realizzazione delle opere riguardanti la “*Variazione programma lavori - progetto Bonaccia Est*” chiedendo la pronuncia di compatibilità ambientale. In data 15/06/09, il MATTM ha decretato, con giudizio positivo, la compatibilità ambientale del progetto (*DSA-DEC-2009-0000582*).

Nel documento SIA, Eni ha presentato i risultati di uno studio modellistico geomeccanico a elementi finiti (*rel. Eni-INPE: Campo di Bonaccia Est - Modello predittivo di subsidenza del settembre 2007*) per valutare la possibile subsidenza indotta dalla produzione di gas dei sopraccitati pozzi Bonaccia Est 2dir e Bonaccia Est 3dir; tale studio è stato basato sui risultati della revisione degli studi statico e dinamico di giacimento (Bonaccia-Bonaccia Est), riportati nella nota integrativa “*Eni-INPE: Relazione Tecnica per perforazione e allacciamento alla produzione - 98/2007 del luglio 2007*”.

Le previsioni del modello geomeccanico hanno stimato, nel caso dello sviluppo di Bonaccia Est, una subsidenza massima pari a 22 cm al 2015 che si assesta a circa 20 cm al 2042 (fine simulazione). Riguardo all’estensione del cono di subsidenza, la distanza della linea d’iso-subsidenza dei 2 cm dalla costa è risultata pari a circa 49 Km.

Il modello dinamico di giacimento (*Eclipse 3D*) del luglio 2007 era stato esteso a tutta l' area interessata dal complesso dei livelli mineralizzati di Bonaccia-Bonaccia Est e all'acquifero circostante. Il profilo di produzione ottenuto prevedeva il recupero di 3355 MSm<sup>3</sup> di riserve residue in 23 anni. Poiché la produzione cumulativa al 31/12/06 era di 2950 MSm<sup>3</sup>, le riserve totali del campo ammontavano a tale data a 6305 MSm<sup>3</sup>, di cui 1845 MSm<sup>3</sup> di riserve residue producibili dai livelli di Bonaccia e 1510 MSm<sup>3</sup> dalla culminazione Bonaccia Est.

Nel 2011 si è stato nuovamente aggiornato il modello *Eclipse* di giacimento (*rel. GISE 09/2011 - Studio di giacimento valutazione potenziale residuo e sviluppo area NW*) allo scopo:

- di progettare lo sviluppo dell'area NW del campo con l'installazione di una nuova piattaforma da cui perforare 4 pozzi: Bonaccia NW 1dir, Bonaccia NW 2dir, Bonaccia NW 3dir e Bonaccia NW 4dir (*rel. GIAC/CS 31-2011 del novembre 2011 Campo di Bonaccia Progetto di sviluppo – Realizzazione dei pozzi - Relazione tecnica di giacimento*);
- di massimizzare i recuperi di gas sia dall'area "principale" che da quella "Est".

La revisione geologico-strutturale del giacimento è stata fatta utilizzando la reinterpretazione sismica dell'area NW del 2010.

Il volume di GOIP stimato dal nuovo studio di giacimento è stato pari a 13280 MSm<sup>3</sup> (11655 MSm<sup>3</sup> nello studio del luglio 2007); tale cifra include anche il volume di gas in posto nella culminazione NW. Le riserve totali calcolate con questa revisione sono risultate di 9083 MSm<sup>3</sup> recuperabili al 2038, di cui 1999 MSm<sup>3</sup> associati allo sviluppo dell'area NW del campo. Il fattore di recupero finale del campo, con riferimento al GOIP 2011, è stato valutato, pertanto, pari al 68%. Tali riserve si sono, quindi, incrementate del 44% rispetto a quelle dello studio del luglio 2007 (6305 MSm<sup>3</sup> producibili al 2029) a fronte di un incremento del GOIP pari al 14%.

Nel 2014 è stato nuovamente rivisto il modello *Eclipse* del giacimento (*rel. GISE 09-14 del luglio 2014 "Aggiornamento studio di giacimento per modello geomeccanico"*) per aggiornarne l'history match sulla base produzioni mensili storiche sino al giugno 2014.

Il nuovo studio si è proposto, inoltre, di verificare le valutazioni fatte con lo studio 2011 per lo sviluppo delle aree NW ed Est del campo (sviluppo dell'area NW con la perforazione di 4 pozzi e *infilling* dell'area Est con la perforazione di un pozzo). Allo scopo, il modello geo-

strutturale del campo e la caratterizzazione petrofisica dei *layers* di tale studio sono stati considerati ancora validi, in quanto non sono stati in seguito acquisiti nuovi dati geologici.

Il GOIP statico non è stato modificato rispetto allo studio 2011, mentre il GOIP dinamico *post-history match* è risultato incrementato a 13761 MSm<sup>3</sup> (studio 2011 pari a 13280 MSm<sup>3</sup>).

Nel caso *Do Nothing* + Sviluppo Area NW + *Infilling* Area Est, la produzione di gas per il periodo 01/06/2014 – 01/01/2036 è stata prevista pari a 4018 MSm<sup>3</sup>, di cui:

- 1127 MSm<sup>3</sup> *Do Nothing*;
- 2409 MSm<sup>3</sup> Sviluppo Area NW;
- 482 MSm<sup>3</sup> *Infilling* Area Est.

Complessivamente il nuovo modello di giacimento ha valutato le riserve complessive di tutta l'area in 9160 MSm<sup>3</sup> al 2035 (Figure 3a e 3b).

Nel corso del 2015 è stato avviato il nuovo progetto di sviluppo che ha interessato la culminazione NW del campo di Bonaccia e per cui sono stati perforati 3 pozzi, Bonaccia NW 1dir, Bonaccia NW 2dir e Bonaccia NW 3dir, a partire dalla nuova p.ma di Bonaccia NW, che è stata allacciata alla piattaforma preesistente di Bonaccia e avviata alla produzione a ottobre 2015. Su questa piattaforma è stato installato un CGPS per il monitoraggio della subsidenza in aggiunta a quello già messo in opera nel 2008 sulla p.ma Bonaccia. Il pozzo Bonaccia NW 1dir è stato poi equipaggiato con *marker* per il controllo *in-situ* della compattazione profonda. Dopo l'installazione dei *marker*, nel tratto di foro compreso tra 709 m e 1092 m (MD) circa, si è acquisito nell'agosto 2015 il rilievo base.

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 pari a 6240 MSm<sup>3</sup> al 31/12/17.

In Figura 5 è presentato il confronto tra i profili di pressione calcolati da modello *Eclipse* del luglio 2014 e le pressioni statiche misurate in due livelli rappresentativi del campo (livello PLQ-B e PLQ2-Ca2) che mostra un carattere conservativo delle previsioni modellistiche.

A seguito degli aggiornamenti dei modelli di giacimento del 2011 e 2014 si sono aggiornati anche i relativi modelli geomeccanici. In particolare, con l'aggiornamento del 2011 (*rel. TE-RA 11/2011- Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW – Modello Elasto-plastico di subsidenza – Management Summary*), il coefficiente di compressibilità uniassiale della roccia serbatoio è stato calibrato sulla base delle misure CGPS, e nel modello si è tenuto conto

nella stima della subsidenza indotta dalla produzione di Bonaccia e di Bonaccia Est anche delle possibili interferenze - idraulica e meccanica - derivanti dalla futura produzione di gas dell'area NW.

In questo aggiornamento si sono considerati 2 possibili scenari produttivi:

- **caso DN** (*Do Nothing*) relativo alla produzione di Bonaccia + Bonaccia Est con fine produzione al 2030 e simulazione protratta al dicembre 2060 per considerare l'effetto di propagazione del disturbo di pressione in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi. Per questo scenario la produzione cumulativa di gas al 2030 è stata prevista in circa 7 GSm<sup>3</sup>;
- **caso 3P** relativo alla produzione di Bonaccia + Bonaccia Est e allo sviluppo di Bonaccia NW con fine produzione al 2040 e simulazione protratta al dicembre 2070 per considerare l'effetto di propagazione del disturbo di pressione in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi. Per questo scenario la produzione cumulativa di gas 2040 è stata prevista in circa 9 GSm<sup>3</sup>.

Per lo scenario relativo al caso **3P** (Bonaccia + Bonaccia Est + Bonaccia NW) la subsidenza massima al termine della simulazione (2070) è stata valutata raggiungere 245 cm. In particolare, sulla culminazione NW la subsidenza è stata stimata in 237 cm. La distanza minima del bordo del cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) dalla costa è risultata, invece, di circa 51 km.

Con il successivo aggiornamento del modello geomeccanico del 2014 (*rel. TERA 11/2014-Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW – Modello Elasto-plastico di subsidenza – Management Summary*), le simulazioni fatte hanno preso in esame due diversi scenari produttivi: uno scenario "*Do Nothing*" e uno scenario "*Do Nothing* + sviluppo area NW + *Infilling Area Est*". Per entrambi gli scenari le simulazioni sono state protratte per oltre 30 anni dopo la chiusura del campo in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

I risultati per i due scenari esaminati sono riassunti nelle seguenti tabelle:

**Tabella 1 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) ed estensione del fenomeno per il caso “Do Nothing”**

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
1-giu-2014	181	12	3
1-gen-2018	193	12	4
1-gen-2033	191	13	4
1-gen-2069	187	14	5

**Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) ed estensione del fenomeno per il caso “Do Nothing + Sviluppo Area NW+Infilling Area Est”**

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
1-giu-2014	181	12	3
1-gen-2033	423	13	4
1-gen-2036	421	13	4
1-gen-2069	398	14	5

L’analisi di tali risultati consente di concludere che:

- nel caso “Do Nothing” il valore massimo di subsidenza è pari a 193 cm. Tale valore è raggiunto nel 2018 e diminuisce leggermente a 187 cm alla fine della simulazione (2069);
- nel caso “Do Nothing + Sviluppo Area NW+Infilling Area Est”, il valore massimo di subsidenza è pari a 423 cm. Tale valore è raggiunto nel 2033 e si riduce a 398 cm alla fine della simulazione (2069).

Anche in questo nuovo aggiornamento del modello geomeccanico la linea d’iso-subsidenza dei 2 cm si mantiene per tutti gli scenari considerati a una distanza dalla costa sempre superiore a 52 km (Figura 6). In Figura 7 è mostrata l’evoluzione della subsidenza nel tempo per il campo di Bonaccia.

Il fatto che tutti gli studi geomeccanici, sino a ora eseguiti tenendo conto dei possibili fenomeni d’interferenza idraulica e meccanica fra i campi dell’area in esame, concordino nel prevedere che il fenomeno della subsidenza si esaurisca a grande distanza dalla costa (cir-

ca 52 km), ha una spiegazione nel particolare assetto geologico dell'area stessa. Tale assetto è ricostruito nella sezione stratigrafico-strutturale di Figura 8, che è stata interpretata su base sismica e controllata con dati di pozzo e nella quale sono evidenziati i rapporti verticali e laterali tra le formazioni (reservoir e copertura) e il substrato.

Lungo la direttrice esaminata (WSW – ENE) in direzione della costa, i livelli mineralizzati si chiudono per limite deposizionale in onlap sui livelli argillosi della F.ne Santerno, che è un'importante barriera idraulica verso costa. La successione terrigena di copertura è, inoltre, relativa a intervalli stratigrafici differenti dalle zone reservoir di Bonaccia-Bonaccia NW. Tutto ciò esclude la possibilità di un'eventuale depressurizzazione e, quindi, compattazione dei sedimenti sia sulla costa sia nelle fasce antistanti al litorale.

Il modello geomeccanico tiene conto della presenza di tale barriera idraulica di tipo sedimentologico-strutturale e, coerentemente, prevede l'esaurimento del fenomeno subsidenziale a grande distanza (circa 52 km) dalla costa.

Inoltre, come analizzato in uno studio del Prof. Colantoni allegato al SIA di Bonaccia NW (11/2011- *Impatti ambientali sulla costa e sui fondali marini dovuti alla subsidenza indotta dalla estrazione di gas dei campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW (Adriatico Centrale) – Prof. P. Colantoni*), sono da escludersi anche possibili effetti trappola e di richiamo dei sedimenti per effetto della formazione di un cono di subsidenza quale quello previsto dal modello geomeccanico per l'area di Bonaccia. Ciò a causa di una dinamica costiera debole, incapace di trasportare il materiale detritico grossolano di spiaggia tipico dell'area costiera antistante al campo. Sono, pure, da escludersi interferenze nella dinamica deposizionale del fondale, essendo l'area in esame caratterizzata da scarsa sedimentazione. In sintesi, lo studio del Prof. Colantoni evidenzia come la possibile subsidenza indotta dall'estrazione di gas prevista nel progetto di Bonaccia NW, e più in generale dal campo di Bonaccia+Bonaccia Est, non possa alterare sensibilmente i processi naturali di trasporto di materiale solido e di sedimentazione dell'area esaminata. In ottemperanza alle prescrizioni contenute nel DEC/VIA 2009-0000582 del 15/06/2009 è stato acquisito un rilievo batimetrico nell'area di Bonaccia-Bonaccia Est tra il 29 novembre 2009 e il 2 marzo 2010.

L'area investigata è situata nel Mare Adriatico Centrale a circa 65 Km a Est da Ancona (Figura 9a). Il rilievo batimetrico di precisione è stato eseguito mediante ecoscandaglio *multi-beam* su un'ampia area di 410 Km<sup>2</sup> comprendente i campi di Bonaccia, Bonaccia Est e

l'area di Bonaccia NW. La carta batimetrica che ne deriva evidenzia una topografia alquanto accidentata, caratterizzata da una sorta di depressione centrale (profondità massima rilevata -91.4 m) limitata verso NW e verso SE da due superfici più alte e regolari in lieve pendenza (profondità minima di circa -79.3 m nella parte nord). La rappresentazione 3D (Figura 9b) mostra chiaramente l'andamento generale e le strutture sedimentarie dei fondali, mentre il dettaglio delle isobate è riportato in Figura 9c.

L'area del rilievo si può idealmente dividere in tre zone, separate all'incirca dalle batimetriche di -83/-84 m: due zone laterali, una a nord-ovest e l'altra a sud-est dell'area, dal fondale piuttosto regolare con basse pendenze e una zona centrale più profonda e articolata. In particolare, si può notare come questa zona centrale sia la più irregolare e presenti diffuse emanazioni di gas, accompagnate da ampie depressioni, affioramenti di rocce e qualche vulcano di fango. Canali e molte strutture tipo *pockmark*, buchi e depressioni accompagnate da qualche concrezione sono, tuttavia, presenti anche nella zona di Nord-Ovest. Più regolare appare invece il dolce pendio della zona di Sud-Est, il quale è tuttavia interrotto verso Est da una netta rottura di pendenza, con un gradino da 83 a 87 m di profondità, causato dalla nicchia di distacco di una frana sottomarina.

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 eseguito), 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 giugno 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 le piattaforme di Bonaccia e Bonaccia NW, con l'acquisizione della campagna 2017, sono in totale disponibili 6 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, in-

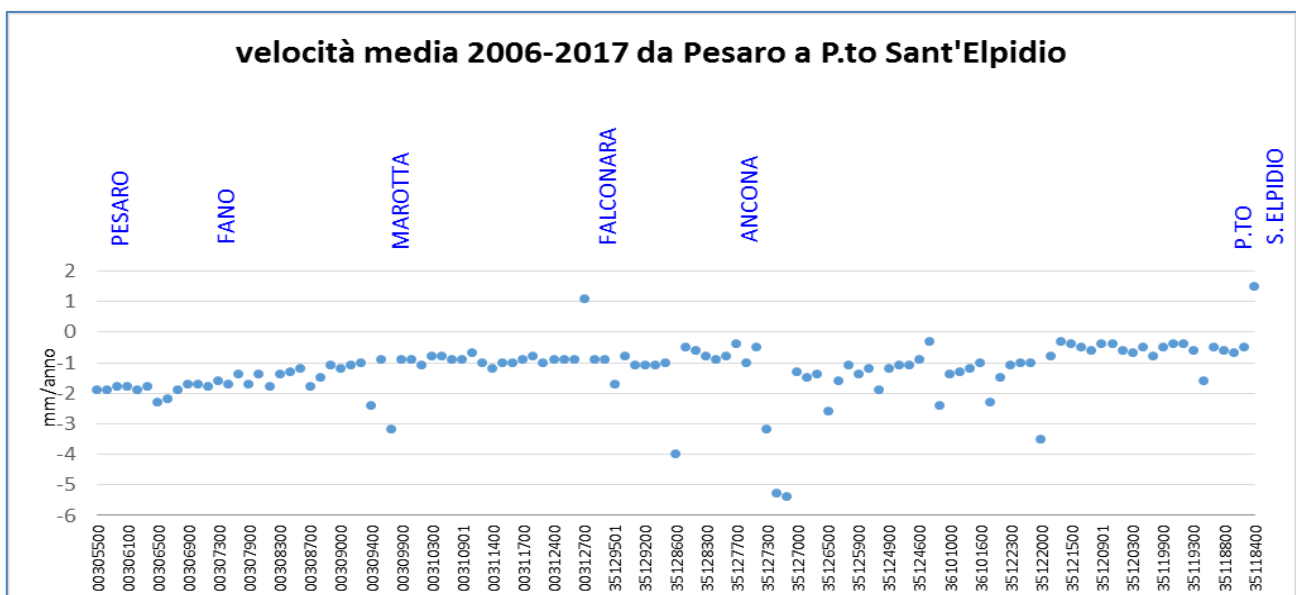
fatti, possono essere talvolta alterate da “disturbi” accidentali intervenuti nel tempo sui manufatti su cui i capisaldi stessi sono stati materializzati.

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)**



<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.

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 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 10).

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 Bonaccia, 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 11), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato in Tabella 3.

**Tabella 3 - 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
Bonaccia	5,61	16,52	-79,30	5,88	15,66	-81,78	-0,27	0,86	2,48

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 d'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 Bonaccia, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale<sup>2</sup> pari a -75,0 mm/a (Figure 11 e 13), in calo rispetto al valore riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-76,2 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 12).

In particolare:

- periodo che va dall'installazione del CGPS al febbraio 2011, in cui la velocità media di subsidenza totale è pari a circa -122,4 mm/a;
- periodo febbraio 2011 - agosto 2017, in cui la velocità media di subsidenza totale è pari a circa -58,38 mm/a, mostrando un rallentamento sensibile rispetto ai valori calcolati nel primo periodo.

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.

Per quanto riguarda poi la stazione CGPS installata nel settembre 2015 sulla piattaforma Bonaccia NW, la serie storica di misure CGPS è inferiore ai 36 mesi e, quindi, non è ancora stata certificata. Si è, comunque, fatta una prima stima della velocità media di subsidenza totale<sup>3</sup> misurata da detta stazione che è risultata pari a -59,8 mm/a (Figure 11A, 12 e 13).

I valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico del 2014 sono stati confrontati con quelli acquisiti dalla stazione CGPS senza che questi ultimi siano stati depurati dalla componente di subsidenza naturale. Come si vede dalle Figure 15 e 15A, l'andamento delle misure

---

<sup>2</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.

<sup>3</sup> La "subsidenza totale CGPS" 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.

GPS di Bonaccia e Bonaccia NW sono in linea con il trend delle previsioni modellistiche. Al fine di monitorare la compattazione profonda del giacimento, in ottemperanza alle prescrizioni ministeriali del progetto di sviluppo di Bonaccia NW, nel 2017 si è proceduto al rilievo dei *marker* installati nel pozzo Bonaccia NW 1dir. Come già detto in precedenza, il rilievo base è stato acquisito nell'agosto 2015, mentre il *survey* di controllo, inizialmente programmato per la fine del 2016, in realtà è stato posticipato ai primi giorni del 2017 a causa di condizioni meteo avverse. Un secondo *survey* di controllo è stato effettuato nel dicembre 2017. Le misure eseguite registrano una compattazione totale dell'intervallo monitorato (709 m – 1092 m MD) di circa 61 mm per il periodo agosto 2015-gennaio 2017 e di circa 63 mm per il periodo gennaio-dicembre 2017 (Figura 14). Poiché la spaziatura dei *marker* non è regolare (in alcuni casi è di 10,5 m mentre in altri è di 5,25 m), di ciò si è tenuto conto nel calcolo della compattazione totale pesando diversamente il contributo dei singoli *spacing*.

I valori misurati di compattazione totale sono risultati in sostanziale accordo con quelli previsti dal modello geomeccanico del 2014 che, per lo scenario “*Do Nothing*”, stima appunto tale compattazione in 59 mm e 17 mm, rispettivamente per i due intervalli di tempo considerati. Per gli stessi intervalli di tempo, lo scenario “*Do Nothing + Sviluppo Area NW + Infilling Area Est*” prevede valori di compattazione nettamente maggiori e pari rispettivamente a 790 mm e 443 mm. In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza, la notevole distanza del campo dalla costa (60 km) e i monitoraggi fatti da Eni consentono di escludere che l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione di gas dal campo di Bonaccia possa avere qualche impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale monitorato.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 16 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 17 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

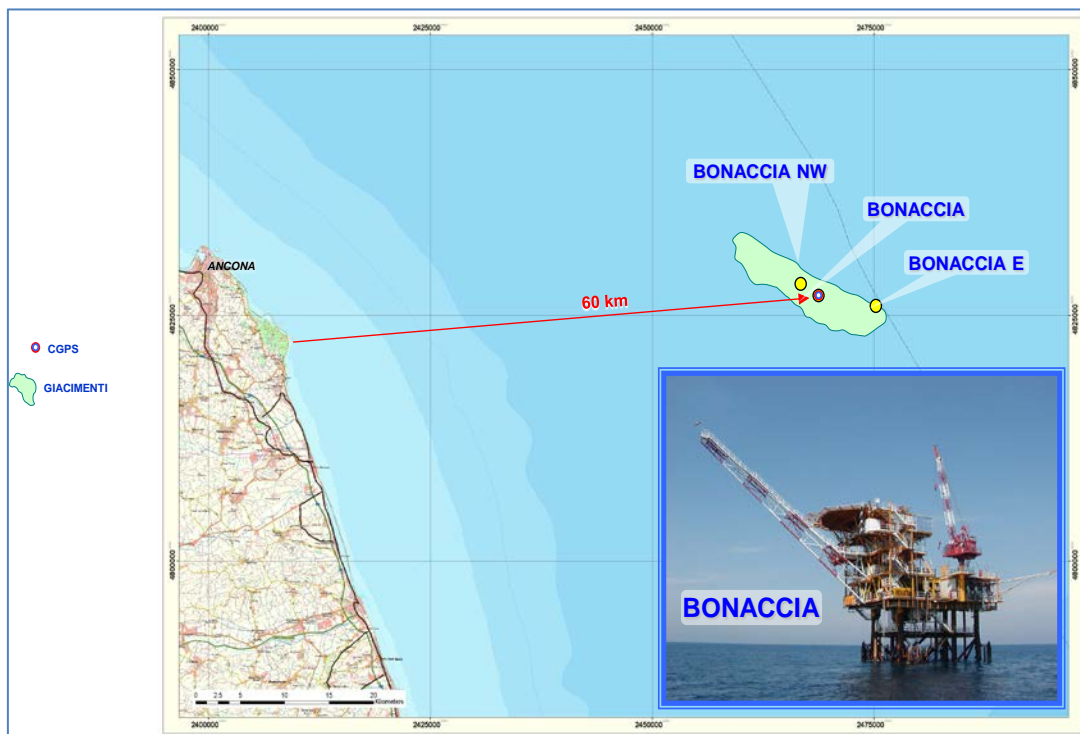


Figura 1 - Ubicazione del campo di Bonaccia

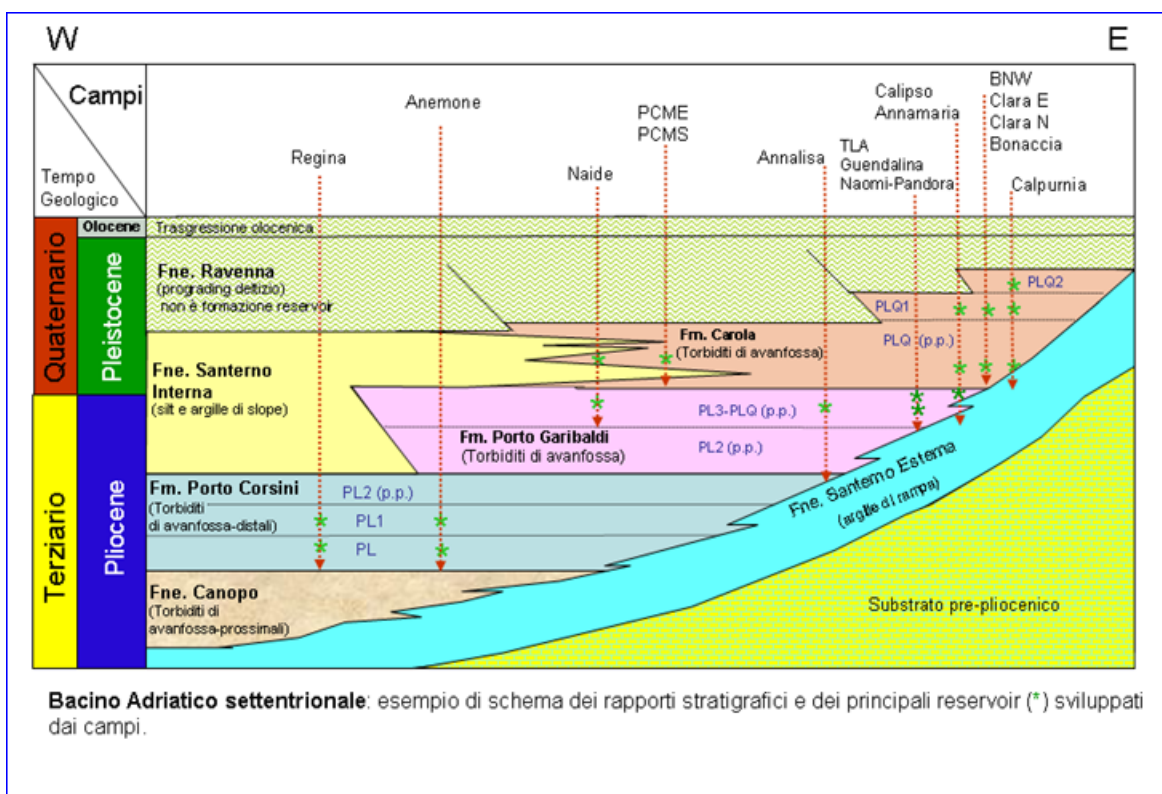


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici





CAMPO DI BONACCIA					
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	348	348	348	348	4%
2000	477	477	825	825	9%
2001	472	472	1297	1297	14%
2002	408	408	1704	1704	19%
2003	353	353	2058	2058	22%
2004	346	346	2404	2404	26%
2005	297	297	2700	2700	29%
2006	250	250	2950	2950	32%
2007	233	233	3183	3183	35%
2008	380	380	3563	3563	39%
2009	298	298	3861	3861	42%
2010	298	298	4159	4159	45%
2011	374	374	4533	4533	49%
2012	309	309	4842	4842	53%
2013	258	258	5100	5100	56%
2014	222	224	5322	5324	58%
2015	229	409	5551	5732	61%
2016	405	581	5956	6313	65%
2017	285	538	6240	6851	68%
2018		441		7293	
2019		340		7633	
2020		266		7899	
2021		220		8119	
2022		197		8316	
2023		158		8473	
2024		131		8605	
2025		105		8710	
2026		86		8796	
2027		69		8866	
2028		61		8926	
2029		45		8971	
2030		49		9020	
2031		41		9061	
2032		33		9094	
2033		29		9123	
2034		27		9149	
2035		10		9160	

Figura 3a – Campo di Bonaccia: produzione e riserve da modello *Eclipse*

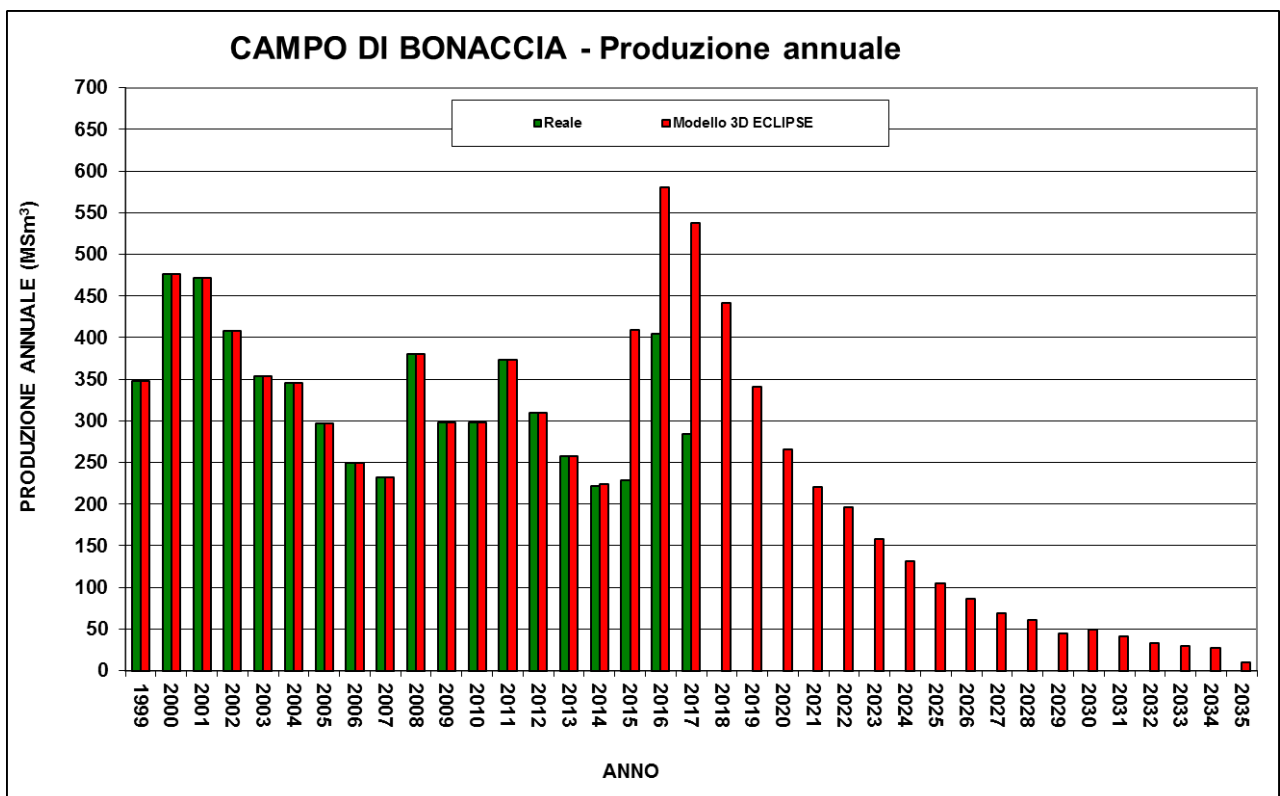
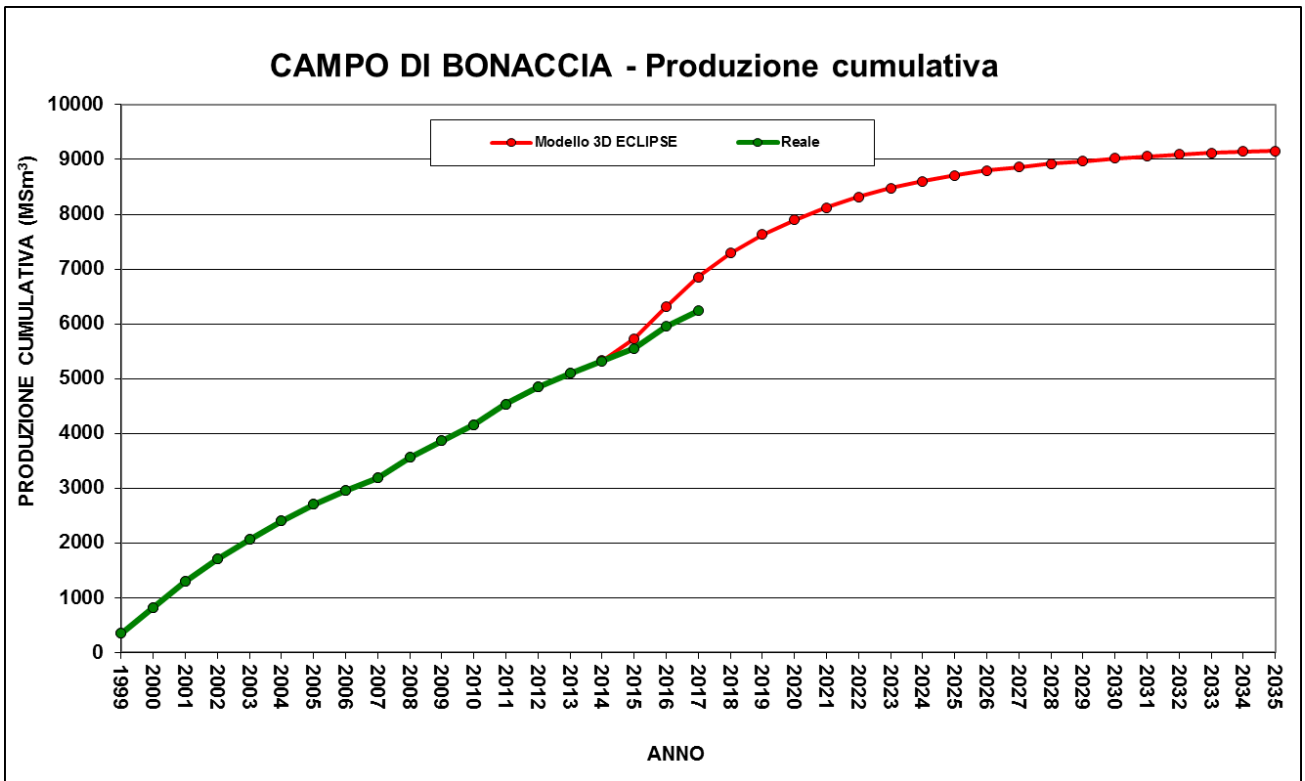


Figura 3b – Campo di Bonaccia: produzione e riserve da modello *Eclipse*

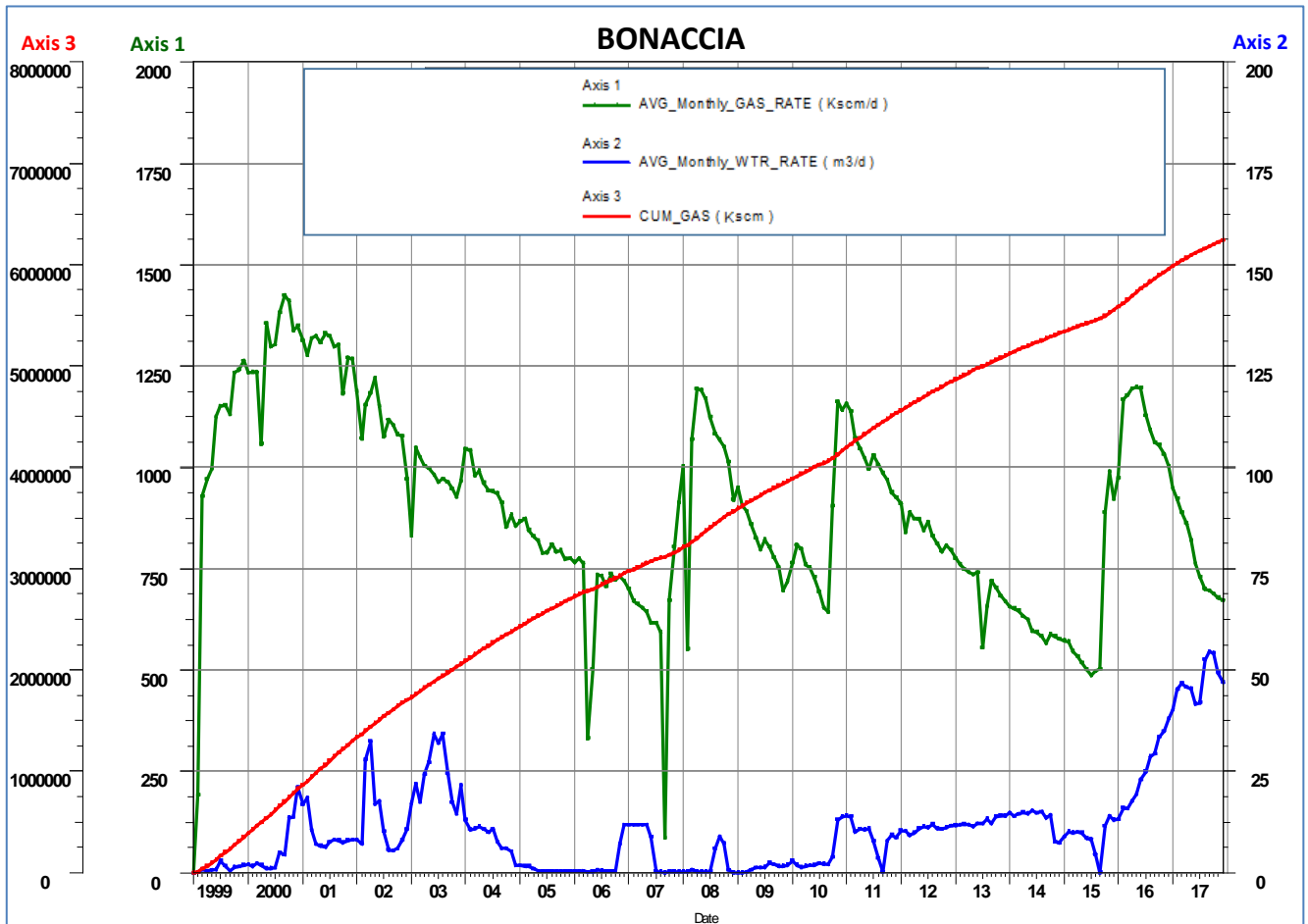


Figura 4 – Campo di Bonaccia: grafico della produzione storica

CAMPO DI BONACCIA						
Data	Livello PLQ-B			Livello PLQ2-Ca2 sup.		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/01/1998	104		7 L			
01/02/2000	98		7 L			
06/10/2007	67	12 Dir				
26/12/2007	64	11 Dir A				
01/05/2004	77		8 L			
01/04/2011	39		8 L			
21/05/2011	36		7 L			
14/12/2013	32		7 L			
06/12/2014	36		7 L			
27/05/2015				74	NW 1 Dir	
11/07/2015	30	NW 3 Dir				
24/04/2016	37		7 L			
22/01/2017				69		NW 2 C
28/11/2017	39		7 L	69		NW 2 C

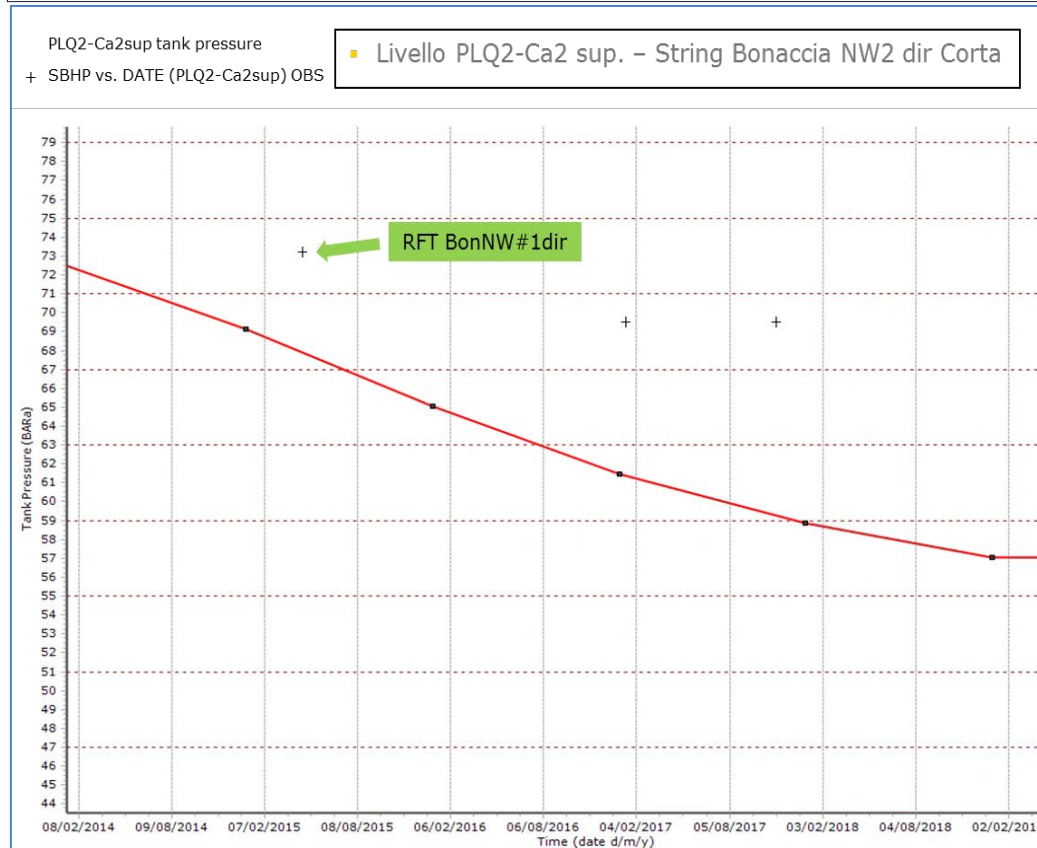
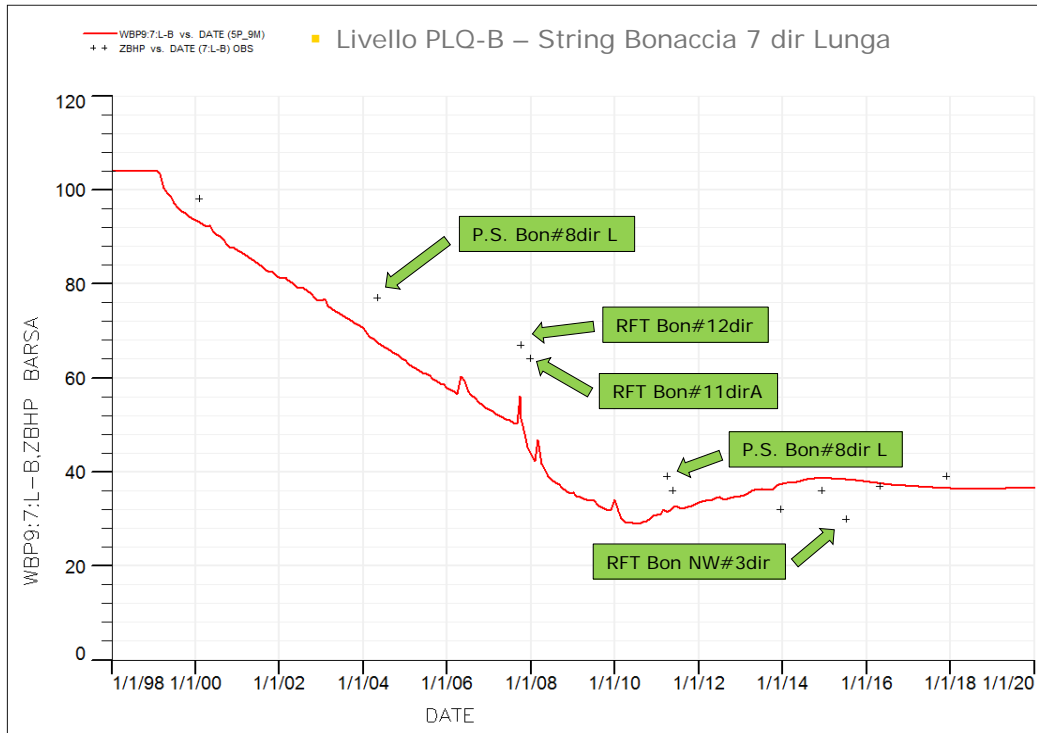


Figura 5 – Campo di Bonaccia: confronto tra i dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2014

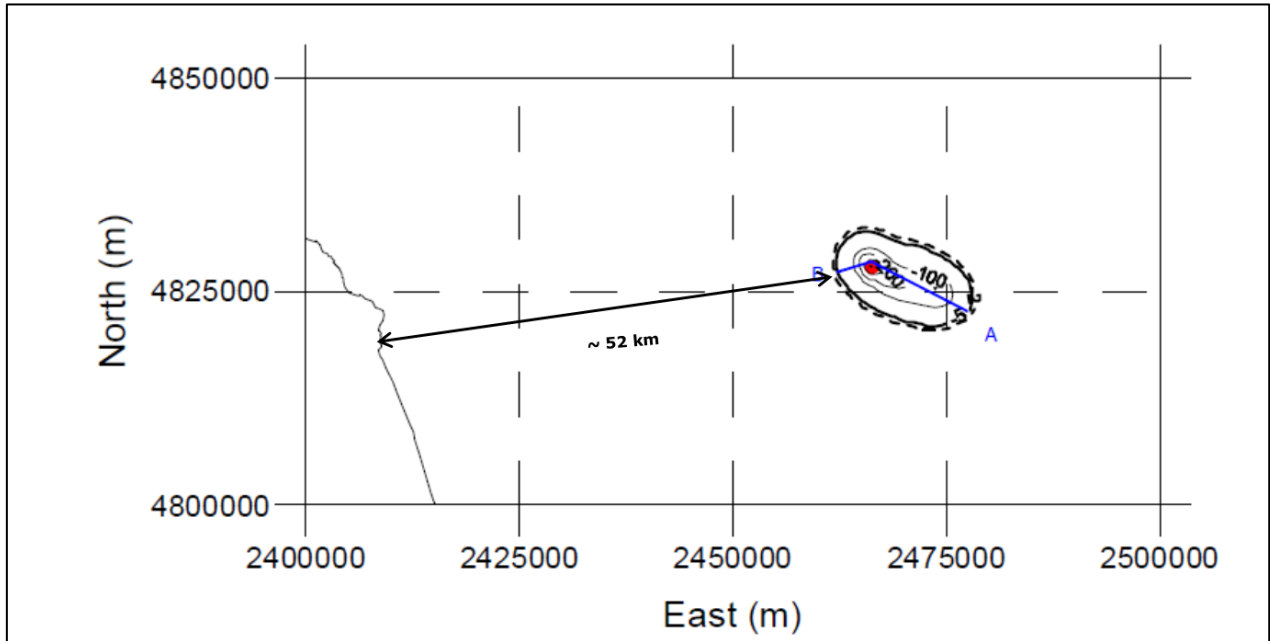


Figura 6 – Campo di Bonaccia: curve di iso-subsidenza a fine produzione (2036)  
caso “Do Nothing + Sviluppo + Infilling area Est”

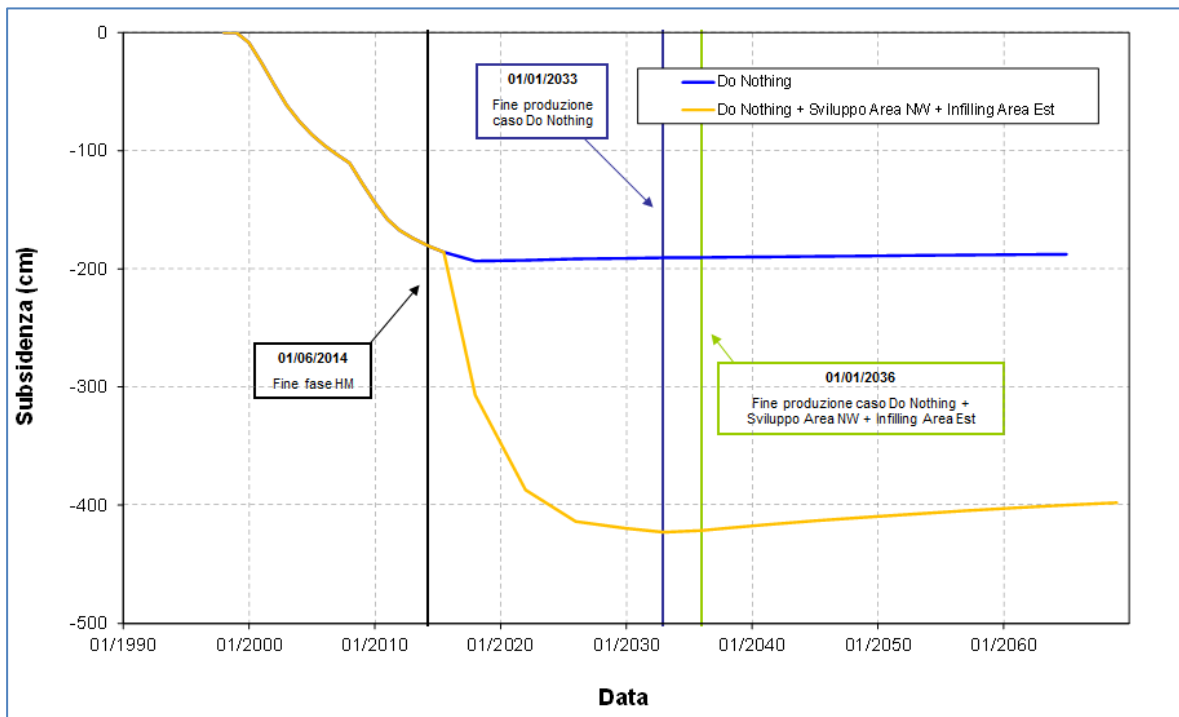


Figura 7- Campo di Bonaccia: evoluzione nel tempo della subsidenza

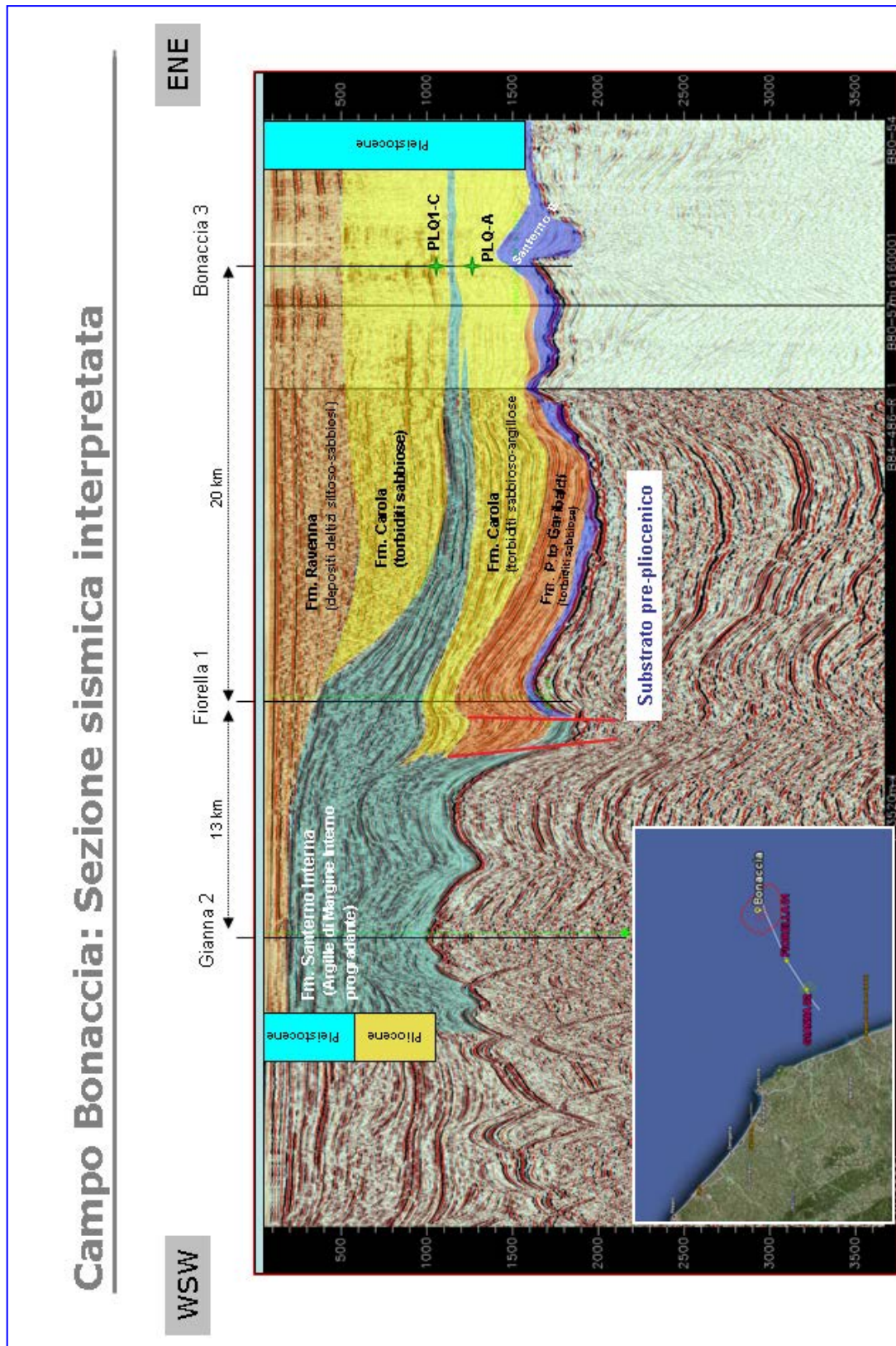
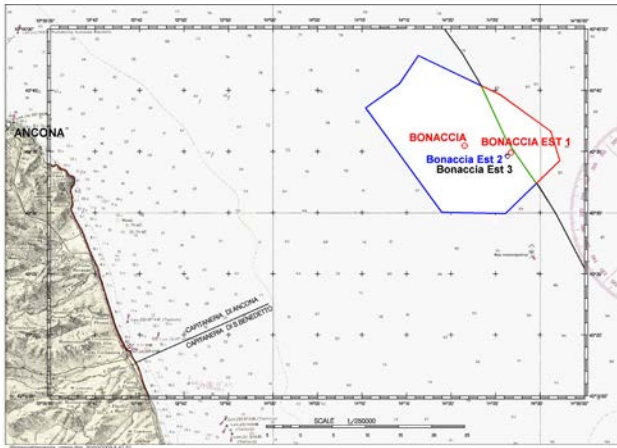
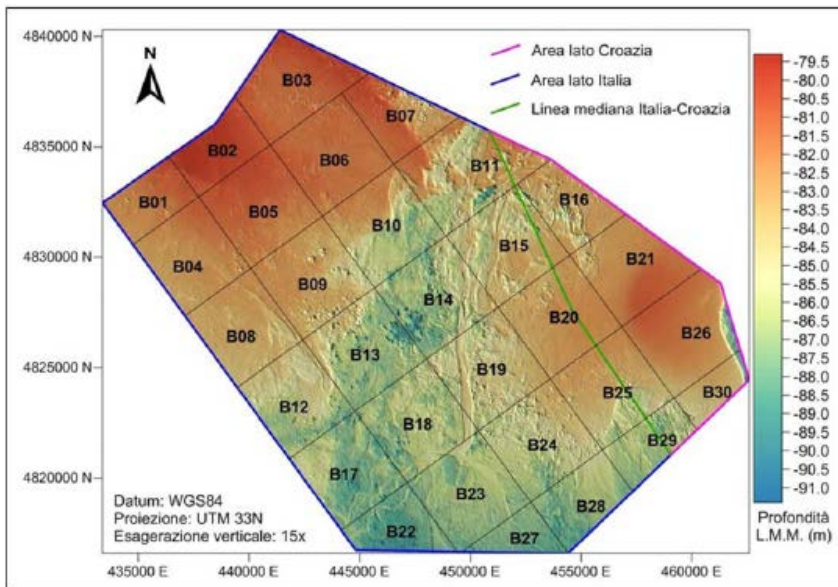


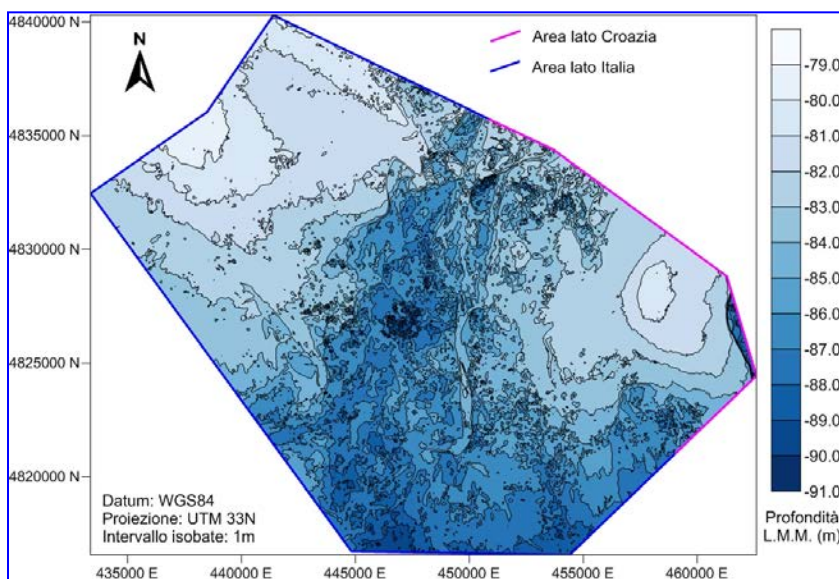
Figura 8 - Sezione sismica interpretata



a) Ubicazione dell'area indagata con ecoscandaglio e localizzazione dei campi a gas



b) Carta batimetrica 3D dell'area rilevata



c) Carta batimetrica dell'area rilevata - mappa-

Figura 9: Campo di Bonaccia: rilievo batimetrico

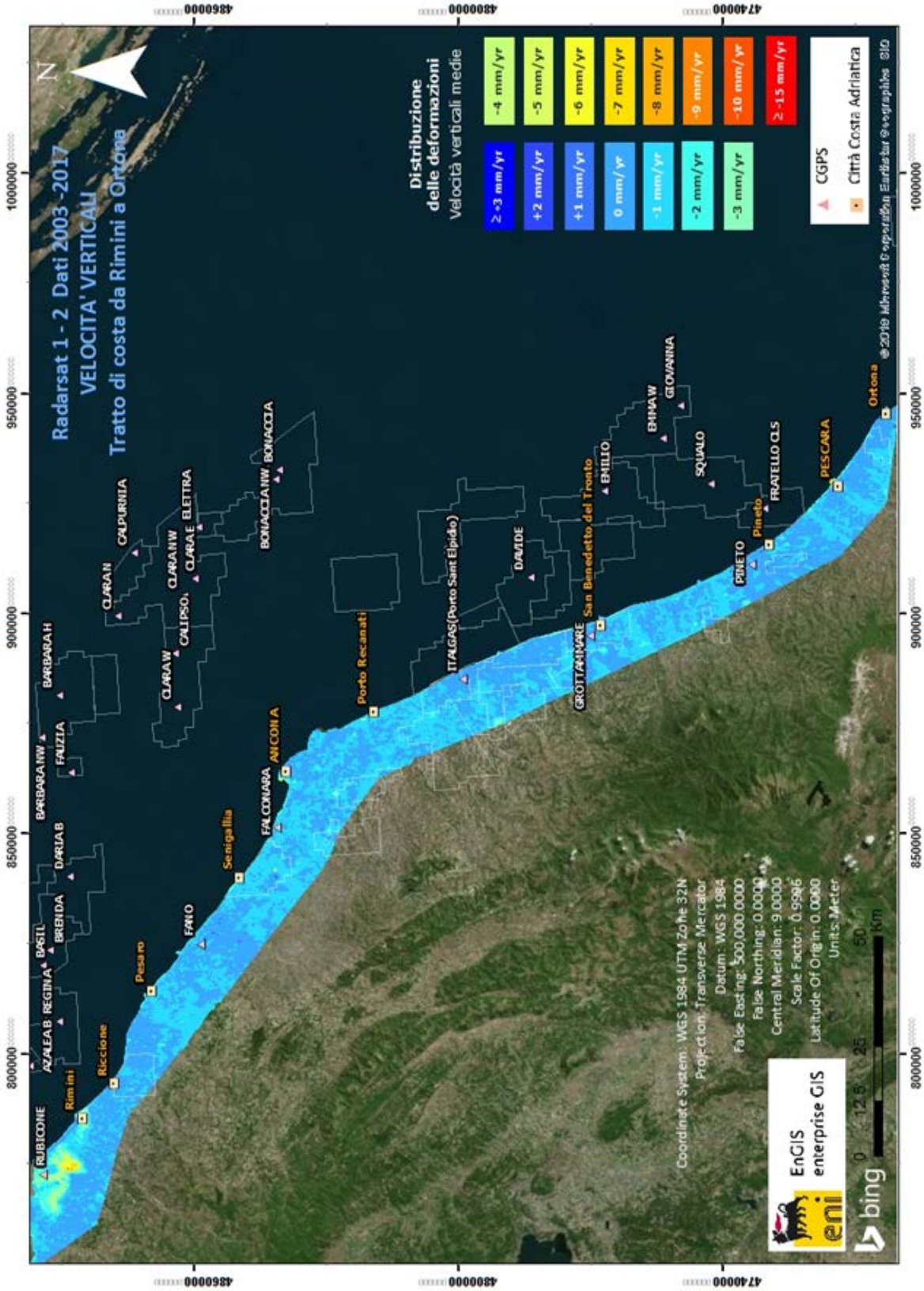
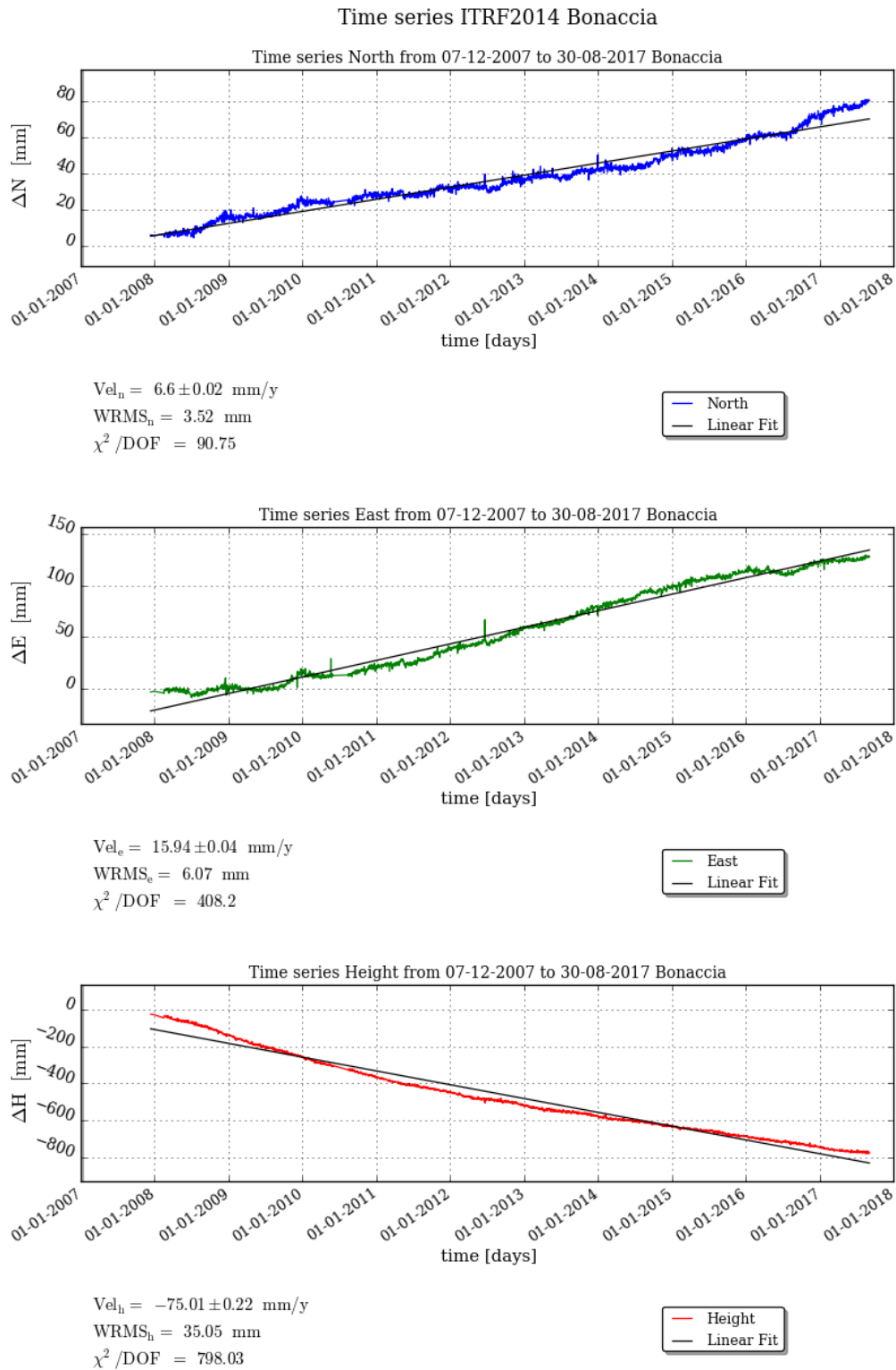
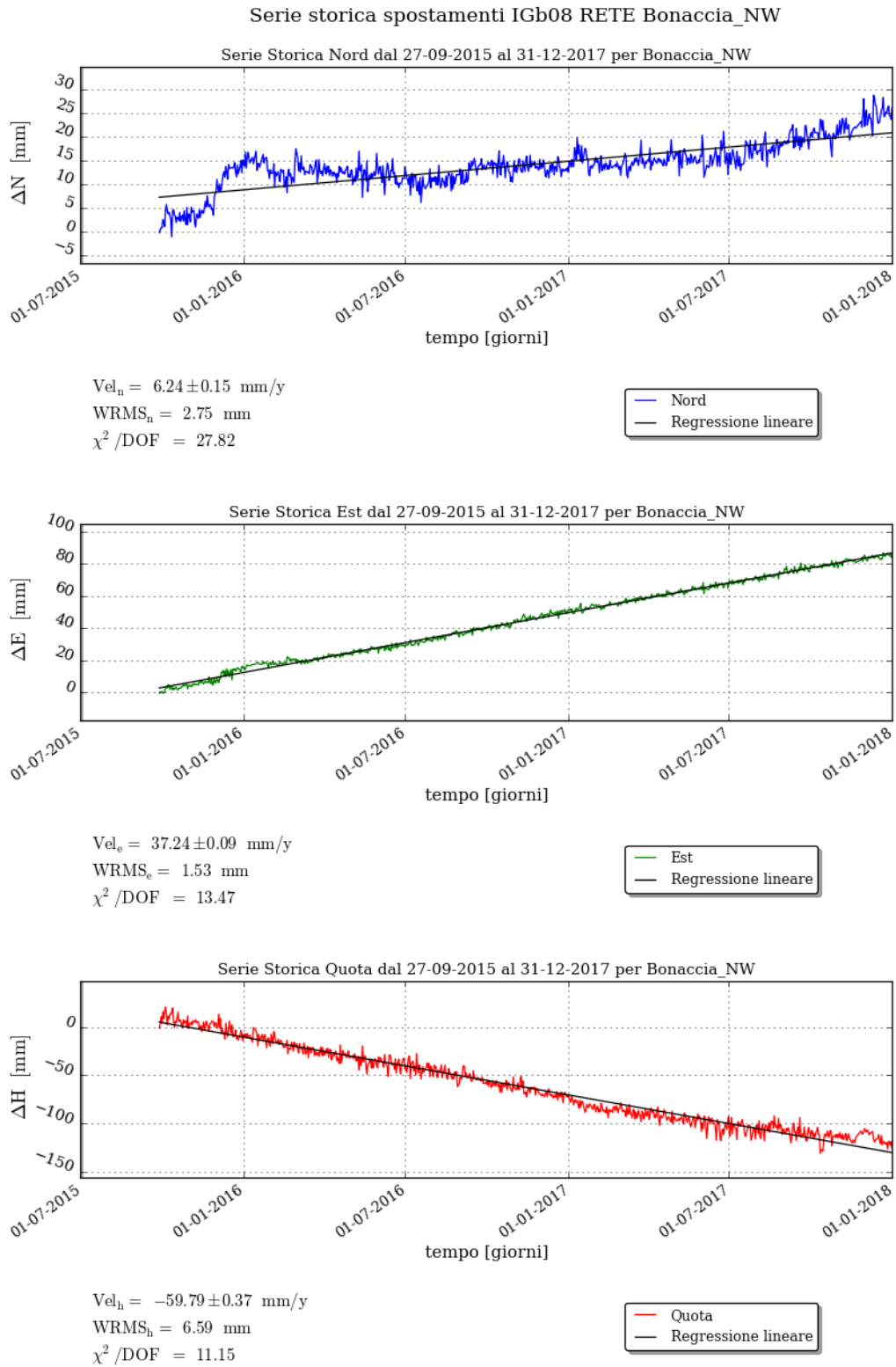


Figura 10 – Campo di Bonaccia: analisi dei dati SAR dal 2003 al 2017





**Figura 11 – Campo di Bonaccia: serie storiche di misure CGPS  
(stazione CGPS installata sulla p.ma Bonaccia)**



**Figura 11A – Campo di Bonaccia: serie storiche di misure CGPS  
(stazione CGPS installata sulla p.ma Bonaccia NW)**



FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo	velocità [mm/y]	sigma [mm/y]	
03/03/2008 - 16/02/2011	-122.4	0.2	
16/02/2011 - 30/08/2017	-58.38	0.07	

Figura 12 - Campo di Bonaccia: 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 registrazioni
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			-129cm al 2037		nov-07	-13,4	-13,7	invariato	122
CLARA NW	2016	2038	59%	-97cm al 2061	2017	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 13 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli



Compattazione Bonaccia NW1			
spacing	ref depth	Aug 2015	Jan 2017
	MD	Jan 2017	Dec 2017
#	(m)	(mm)	(mm)
45	709,44	-1	-1
44	719,78	-1	-1
43	730,28	0	-1
42	740,78	0	0
41	751,28	-1	-1
40	761,79	-3	-3
39	772,22	3	-3
38	782,69	0	-2
37	793,22	-4	-1
36	803,70	-1	-1
35	814,25	5	-4
34	829,94	12	-14
33	840,48	0	0
32	845,73	0	-2
31	850,89	-3	2
30	856,00	-1	0
29	861,41	-2	-2
28	866,69	0	0
27	871,94	-1	0
26	877,21	-3	-1
25	882,47	-3	2
24	887,74	-3	1
23	898,25	0	-2
22	913,97	-3	1
21	924,40	-2	0
20	929,61	-5	5
19	940,14	-3	-5
18	950,63	-4	-1
17	955,88	-1	0
16	961,11	-4	1
15	966,40	1	-2
14	971,64	-1	0
13	976,88	-2	2
12	982,12	-2	-1
11	987,37	-10	1
10	997,91	-8	-8
9	1008,08	-5	1
8	1018,62	-15	7
7	1029,06	5	-13
6	1039,58	-6	-5
5	1050,09	-3	-2
4	1060,58	3	-2
3	1071,14	-14	-3
2	1081,75	-2	-1
1	1092,22	2	-3

Figura 14 – Campo di Bonaccia: compattazione da *marker* (pozzo Bonaccia NW 1dir)

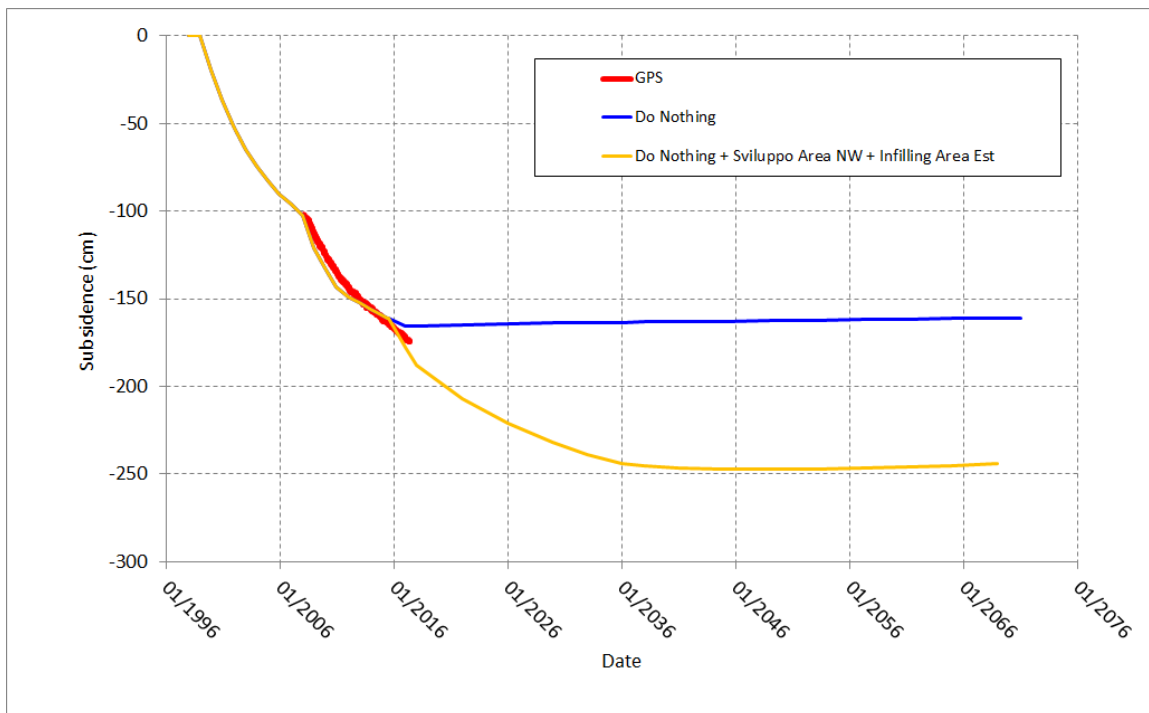


Figura 15- Campo di Bonaccia: abbassamento misurato e calcolato in corrispondenza del CGPS della p.ma di Bonaccia

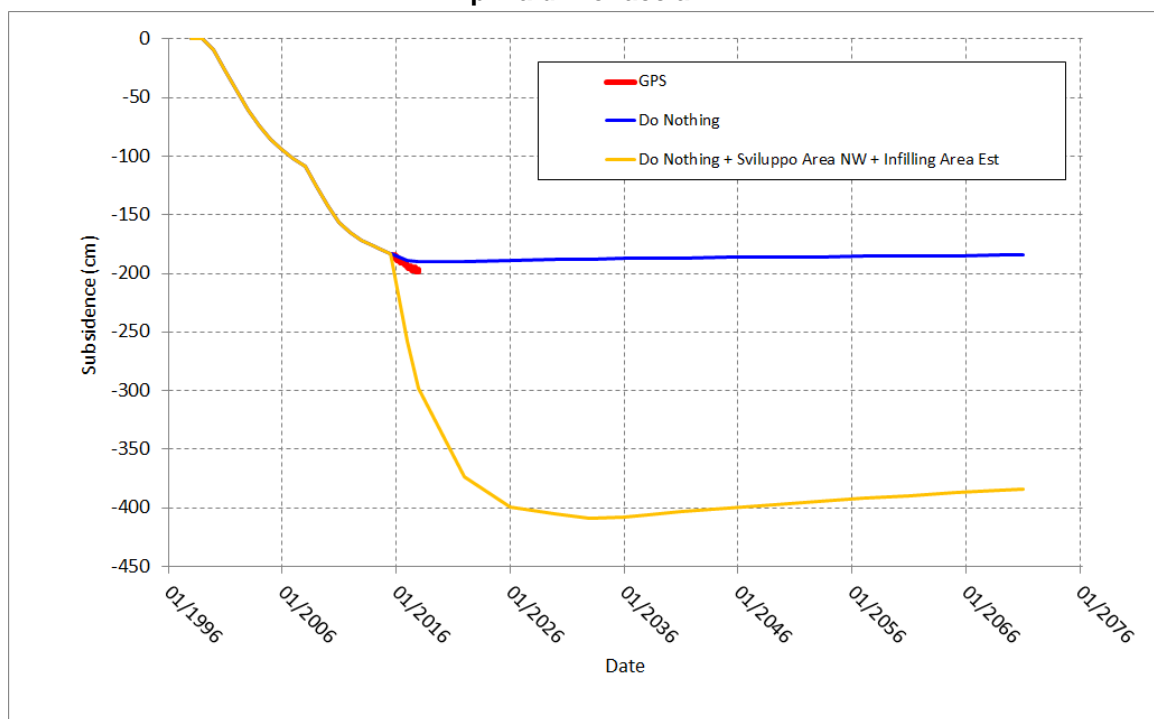


Figura 15 A - Campo di Bonaccia: abbassamento misurato e calcolato in corrispondenza del CGPS della p.ma di Bonaccia NW



campo BONACCIA (BONACCIA - BONACCIA EST - BONACCIA NW) - (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DECIVA n.582 del 15 giugno 2009 (Bonaccia Est) / DECIVA n.222 del 9 settembre 2014 (Bonaccia NW)	
UBICAZIONE	offshore - 57 km a E Monte Conero	AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA	
PROFONDITA' FONDALE	82 m	SIA (BONACCIA-BONACCIA EST)      ULTIMO AGGIORNAMENTO (con BONACCIA NW)	
LITOLOGIA	silt-sabbie fini in livelli sottili	STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "luglio 07"
FORMAZIONE RESERVOIR	Ravenna - Carola	RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	6305      9160
ZONA MINERARIA	PLO1 - PLO	MOD. GEOMECCANICO	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ settembre 2007      ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ novembre 2014
PROFONDITA' RESERVOIR	750 - 1090 (TVDSS)	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	22 (@ 2015)      423 (@ 2040)
TIPO DI PIATTAFORMA	fissa (Bonaccia)	MAX DIST. DAL CULMINE (km)	8 (@ 2042)      5 @ 2089
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	torbiditi sottili	STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
CONCESSIONE	B.C17.TO	LIVELLAZIONI	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	19/10/2018	DAL 2006 SONO OPERATIVE NUOVE LINEE DI LIVELLAZIONE IN ALTA PRECISIONE (DORSALE PESARO-PT.S.GIORGIO) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO. ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE, CERTIFICATI UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM, RELATIVI AGLI ANNI: # 2006-2009, 2011, 2014 e 2017. IL PROSSIMO RILIEVO DELLA "DORSALE PESARO-PT.S.GIORGIO" SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO.	
N. POZZI		MARKERS	
Bonaccia	8	MARKERS SU BONACCIA NW 1Dir: ULTIMO SURVEY @ gennaio 2017. Survey eseguiti: agosto 2015 (rilievo base); novembre 2016	
Bonaccia Est	8	CGPS	
Bonaccia NW	0	Nel corso del 2007 è stato installato un CGPS in piattaforma di Bonaccia. Nel settembre 2015 è stato installato un CGPS sulla nuova piattaforma di Bonaccia NW. Nel tratto di costa antistante il campo è stato installato nel corso del 2009 un CGPS (centrale ENI di P.to	
RISERVE TECNICHE (campo)		SAR	
A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )	6305      9160	ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ Dicembre 2017 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.MA BONACCIA. NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
START UP PRODUZIONE		BATIMETRIE	
Bonaccia	feb-99	ESEGUITO RILIEVO BATIMETRICO. DATA RILIEVO NOV.2006-MARZO 2010	
Bonaccia Est	ott-10		
Bonaccia NW	ott-15		
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2029      2035		
GAS PRODOTTO (campo) (MSm <sup>3</sup> )			
Bonaccia	6240		
Bonaccia Est	4748		
Bonaccia NW	1079		
% RISERVE PRODOTTE	68%		

Figura 16 - Scheda di sintesi dati campo

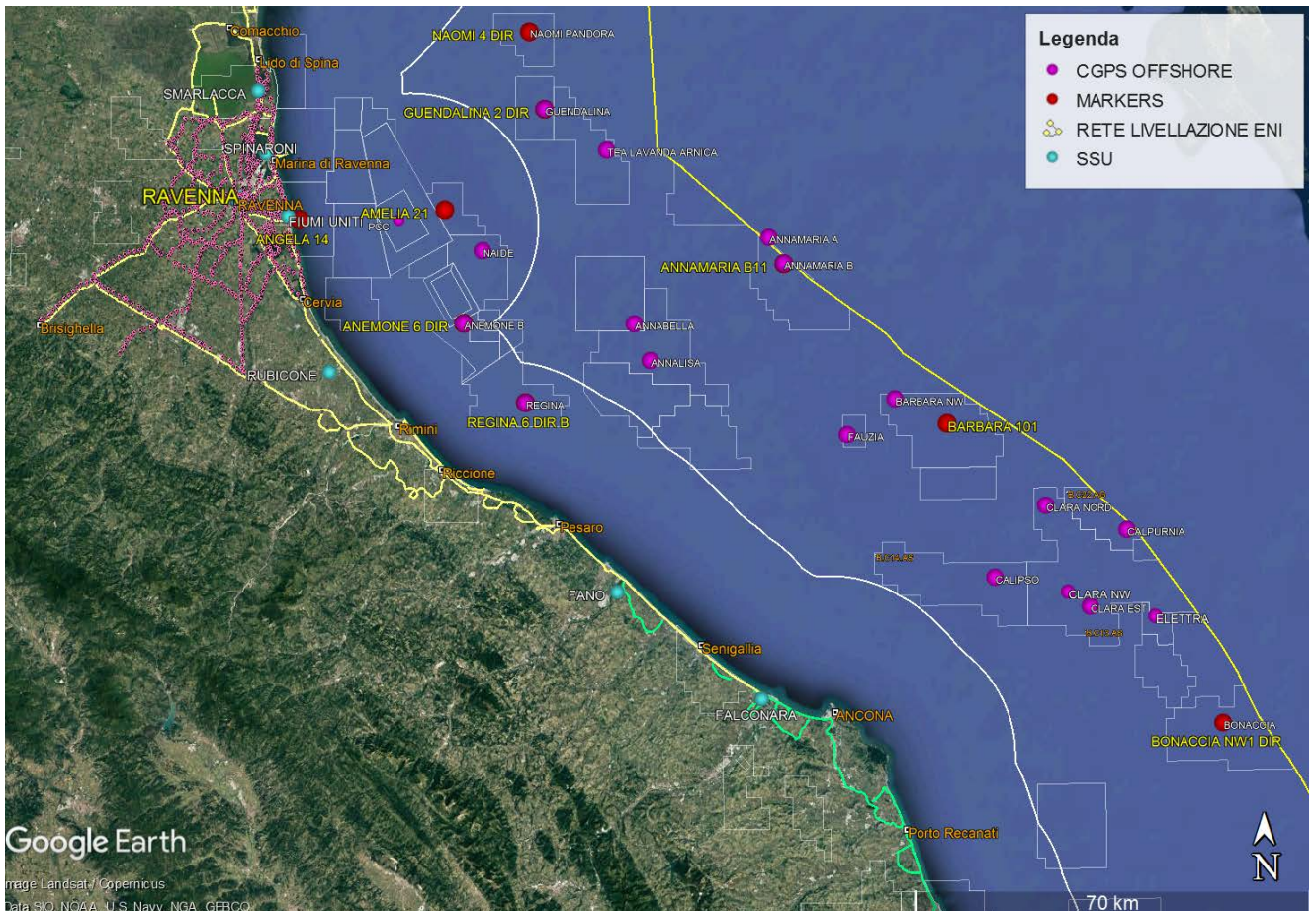


Figura 17 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

## 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 relativi al periodo 2003 – 2016 elaborati con un diverso algoritmo.

### 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 alla corrispondente stazione 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 GPS 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-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 dati CGPS e quelli 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.



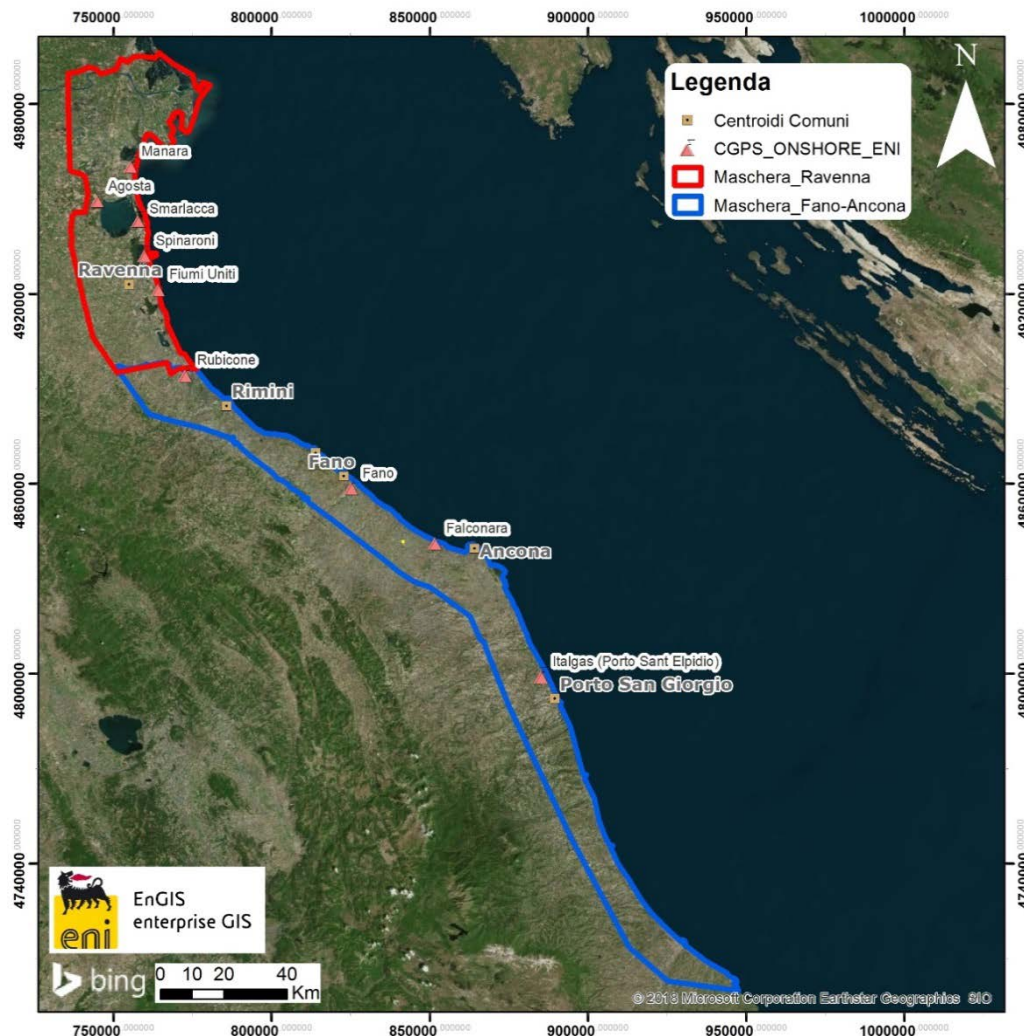


Fig.1A – Mappa mosaicazione dati InSAR

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>.

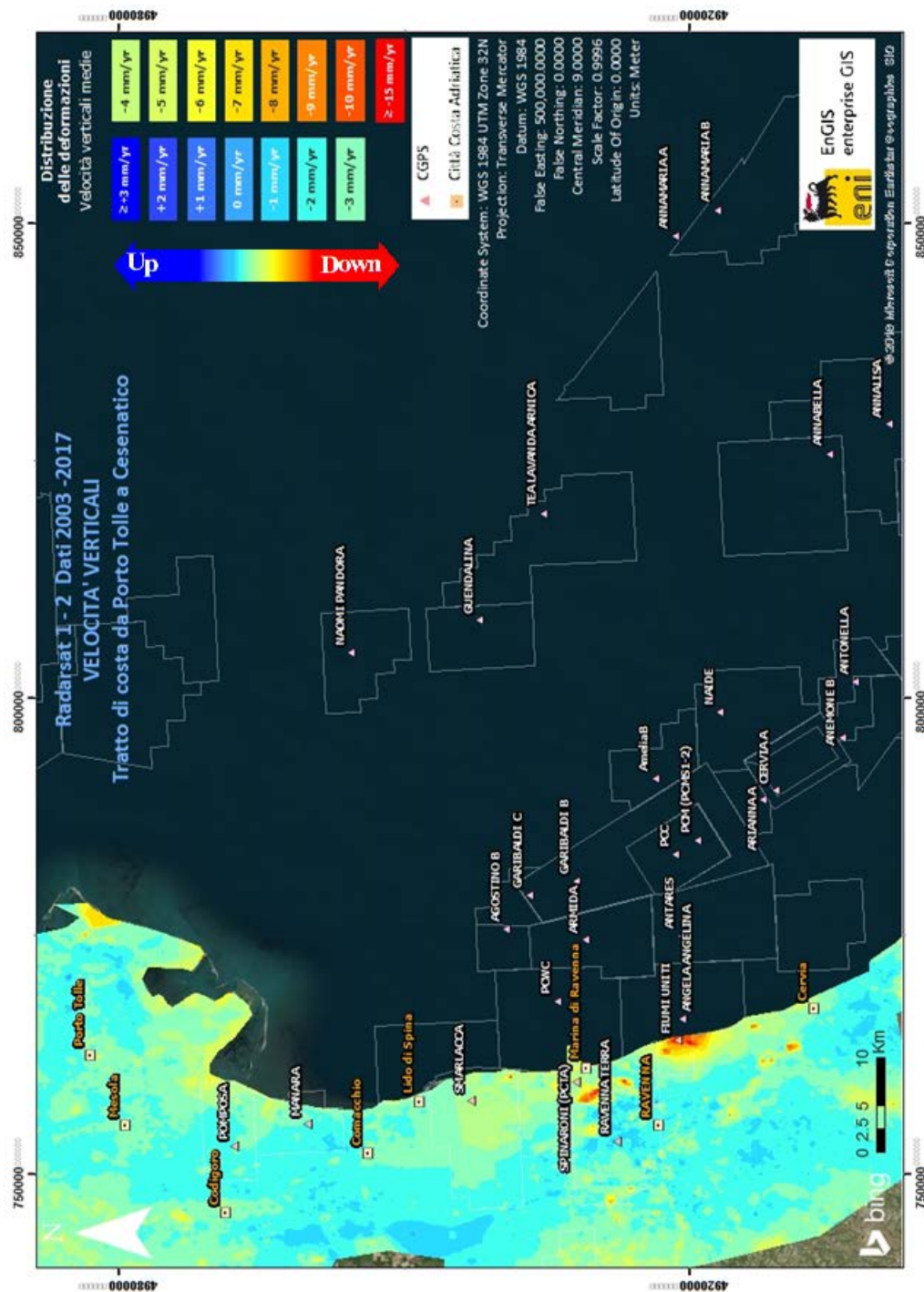


Fig. 2A - Interpolazione IDW (*Inverse Distance Weighted*) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2017, con *Tool ArcGis Spatial Analyst®*. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico

Come già effettuato nel 2016 (vedi relazioni 2017), 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*®.

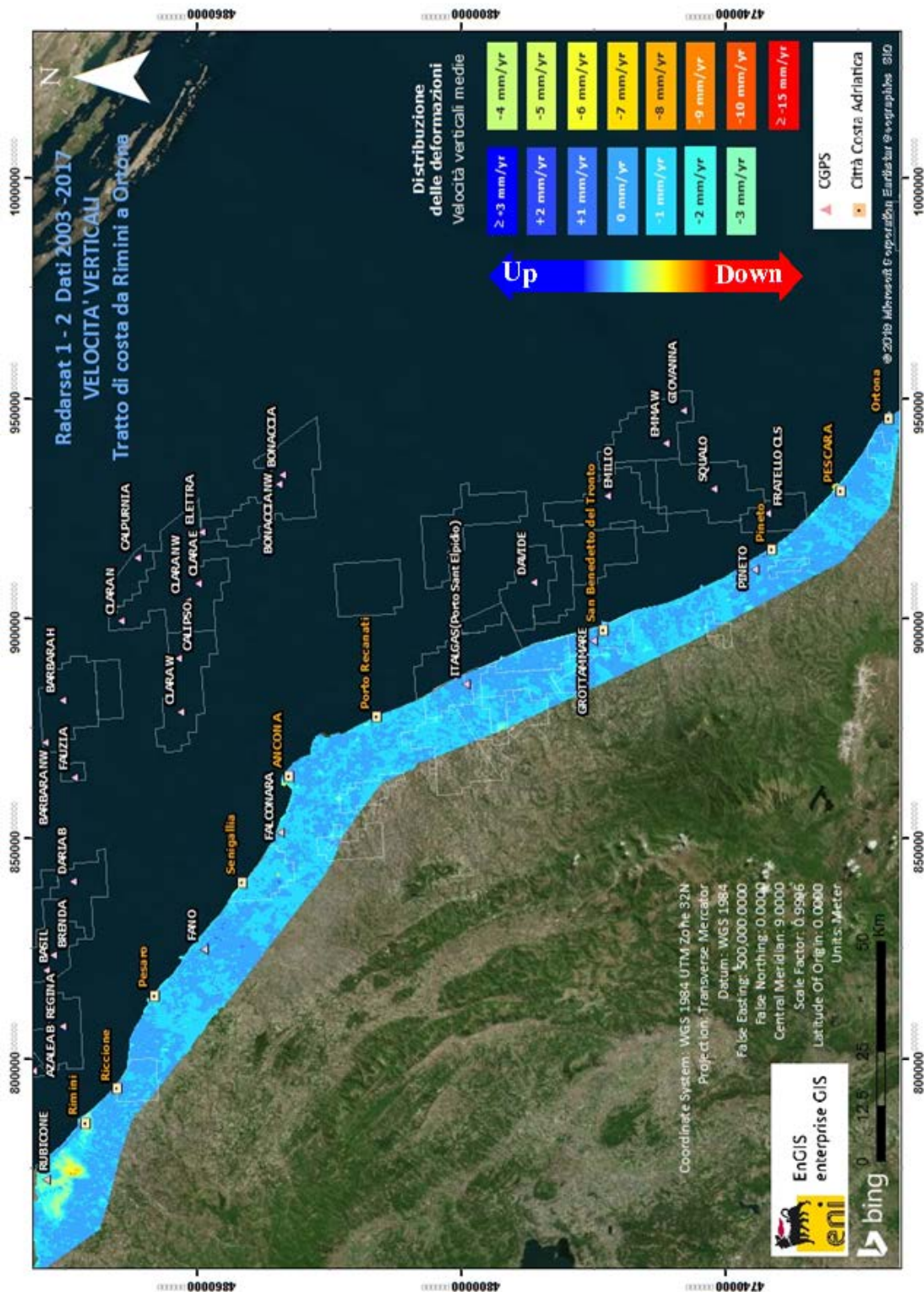


Fig.3A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2017, con Tool ArcGIS Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini a Ortona



### **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.

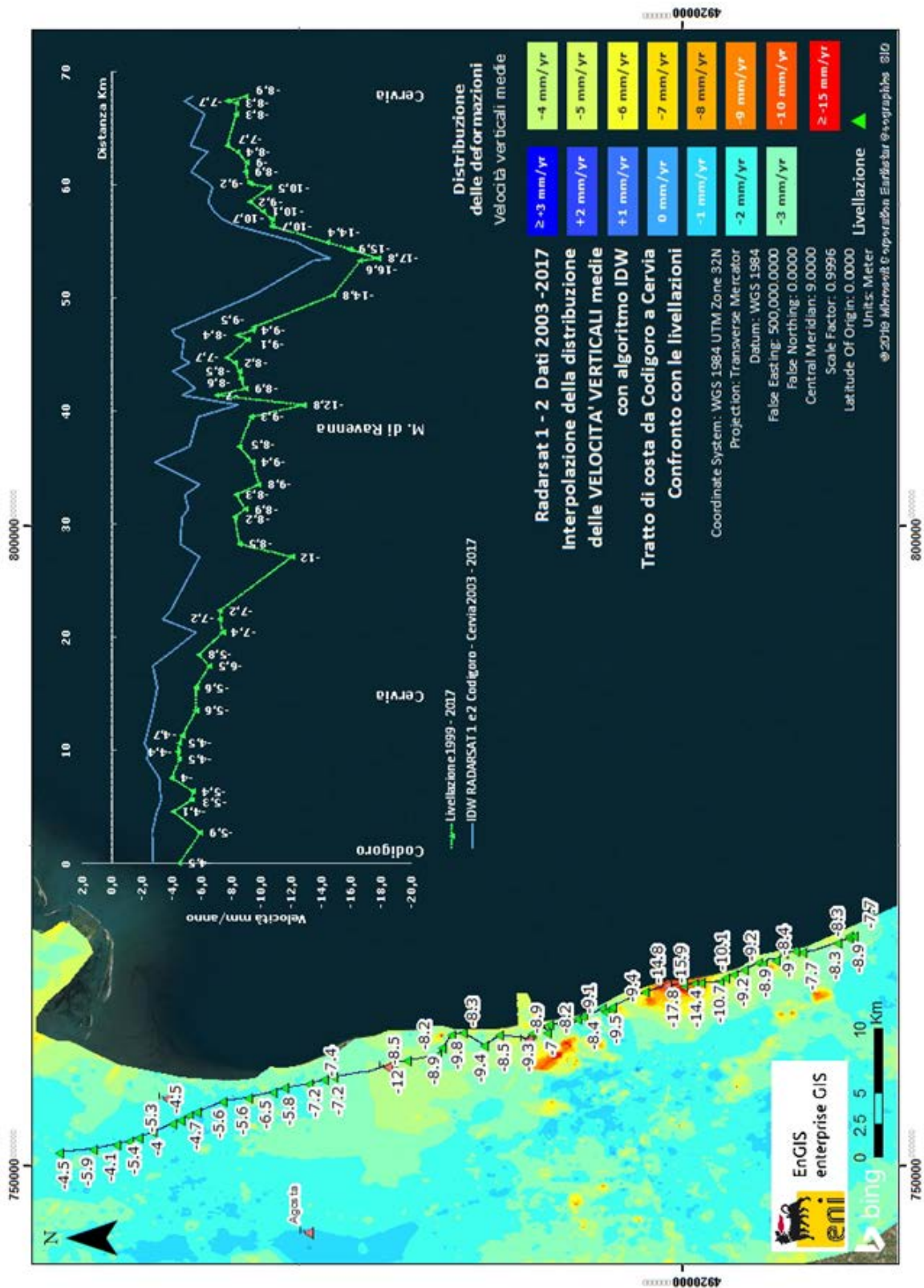
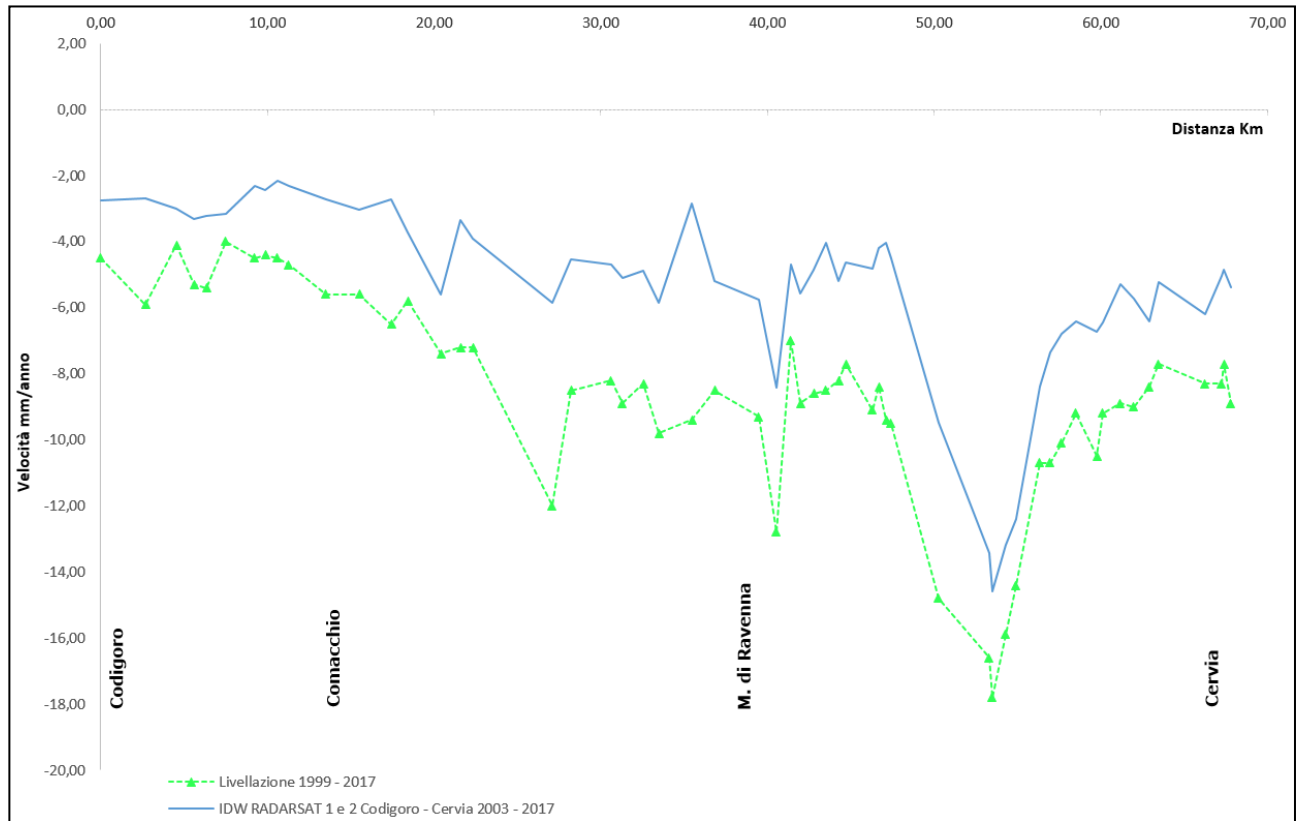


Fig. 4A – Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Codigoro - Cervia



**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**



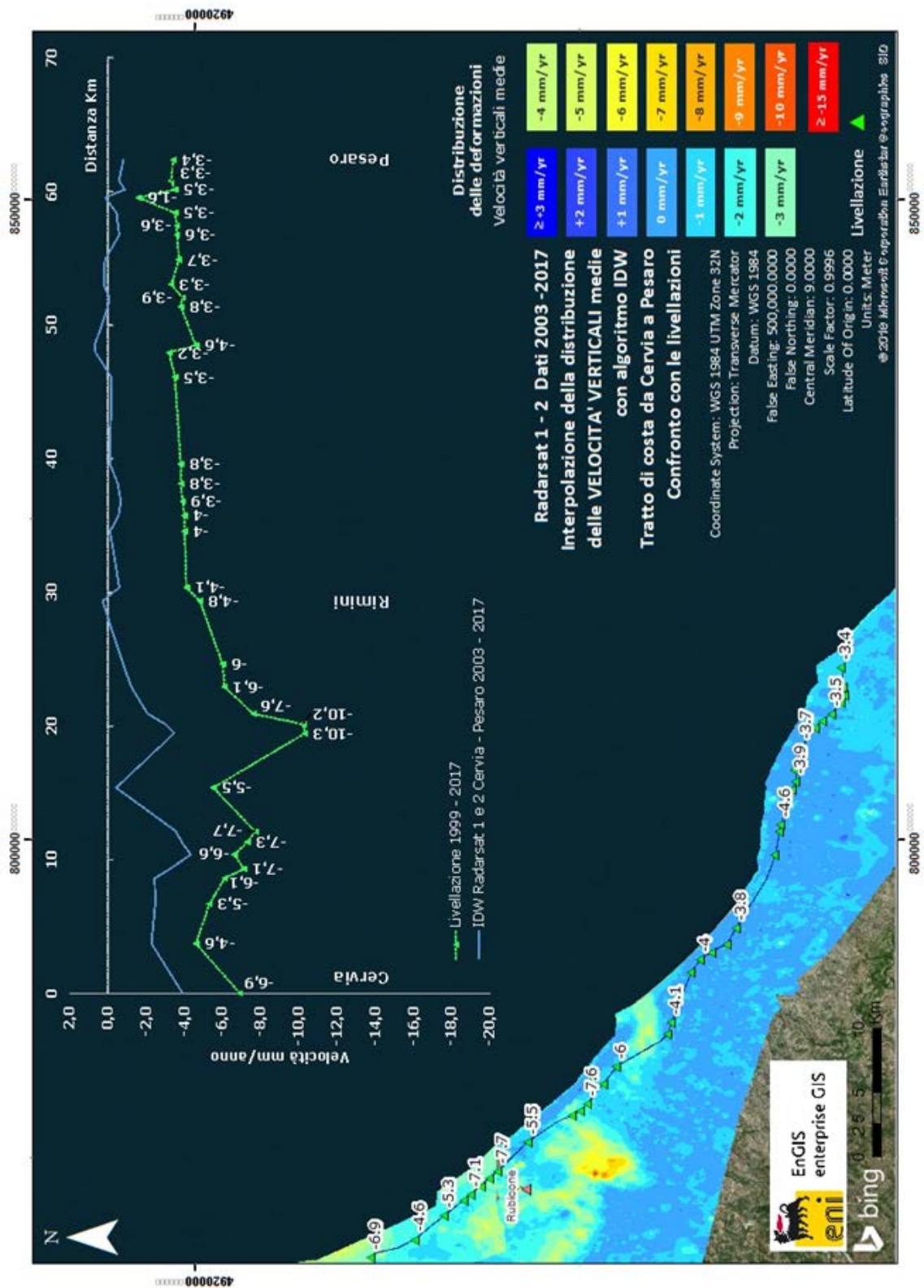
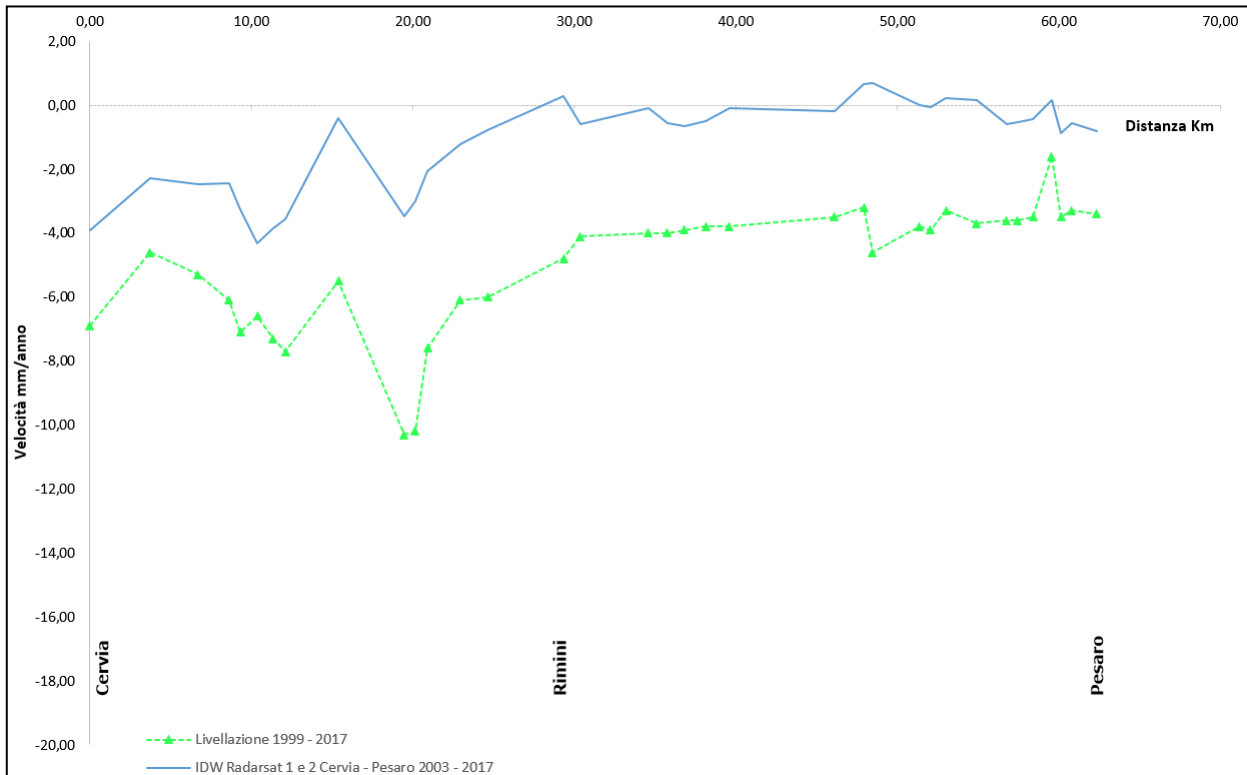


Fig. 6A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Cervia – Pesaro



**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**

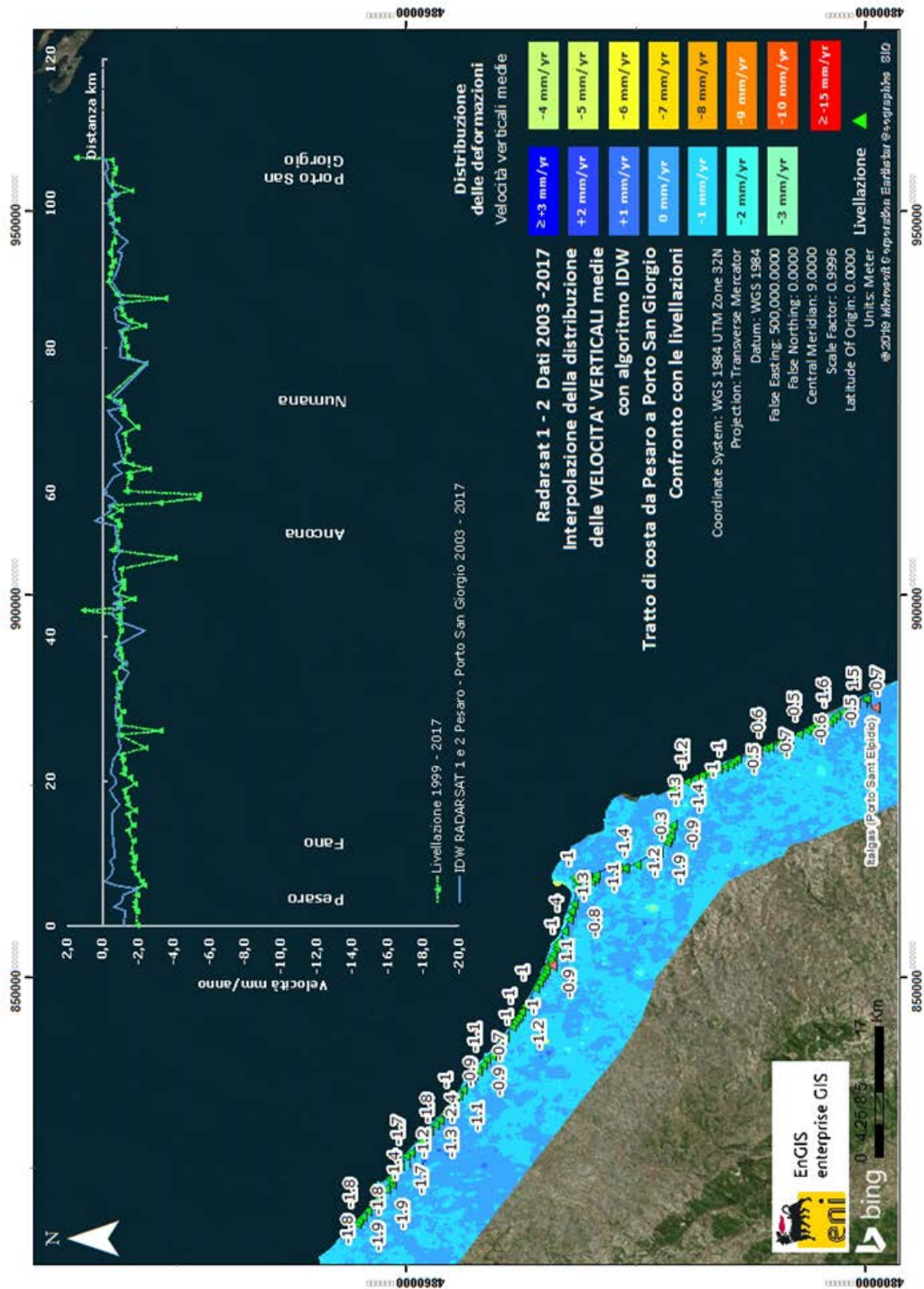
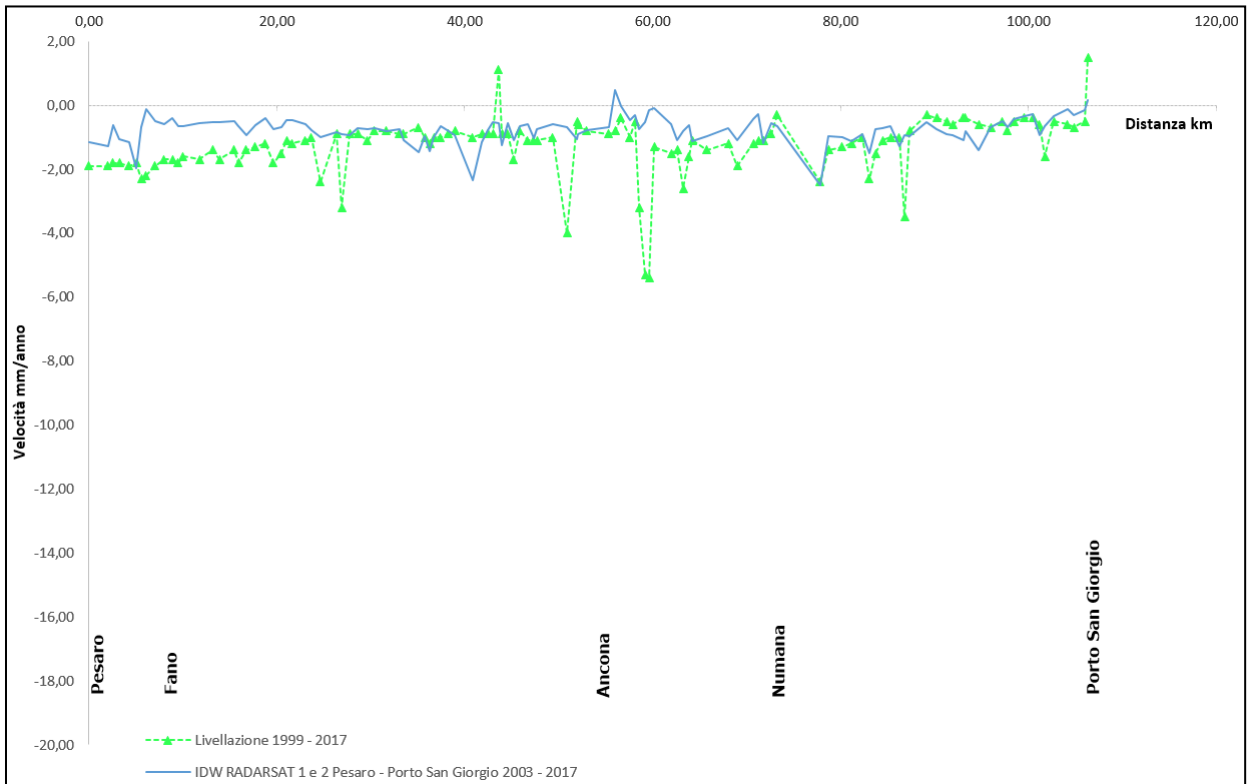


Fig. 8A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Pesaro – Porto San Giorgio



**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>4</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 sotterraneo, 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 orbitali, e in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo).

---

<sup>4</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/)).



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 (Continuous 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 A: 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.

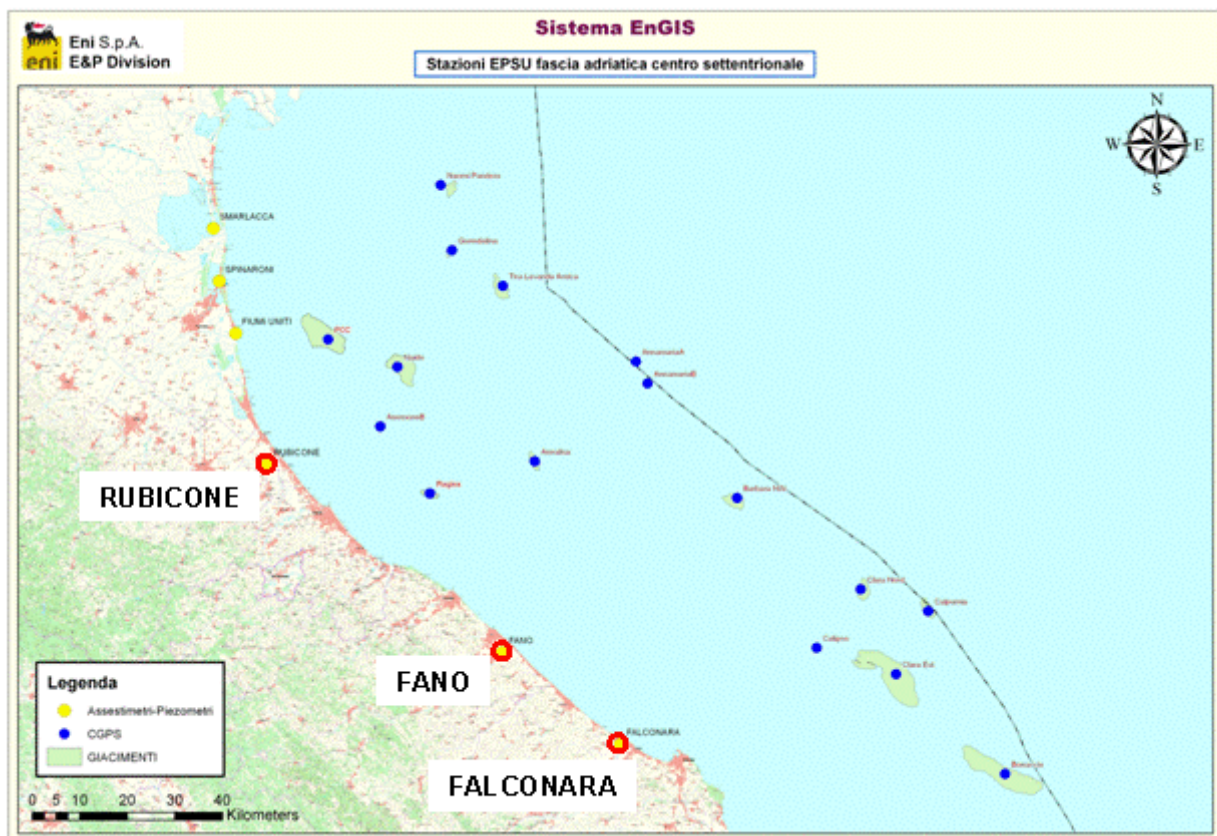


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

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.

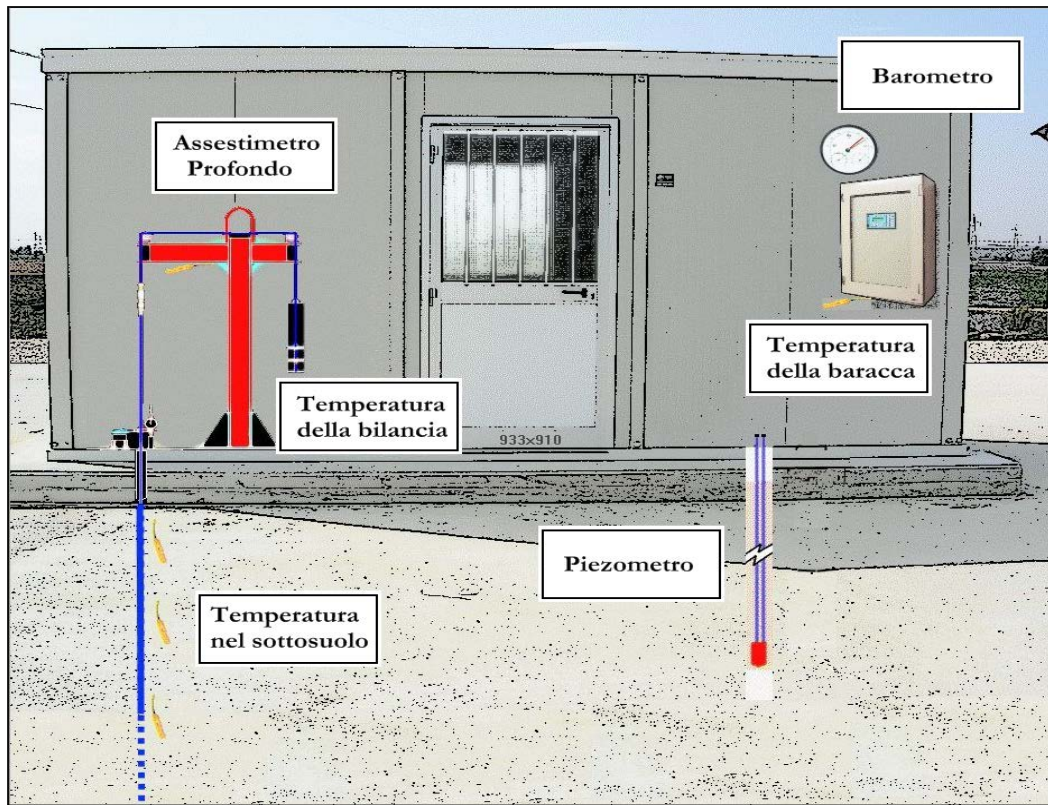


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione *EPSU*



Più in dettaglio, in ciascuna delle 3 stazioni *EPSU* sono state 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: 316 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 assestimetrico.

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:

- 8 aprile 2009 - 22 maggio 2009 una misura ogni ora,
- 22 maggio 2009 - 2 novembre 2009 una misura ogni 2 ore,
- Dal 2 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 piezometri (tipo Casagrande) 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 (316 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 77 m, 150 m e 180 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 indotta 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 (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.

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 freatimetro. 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.

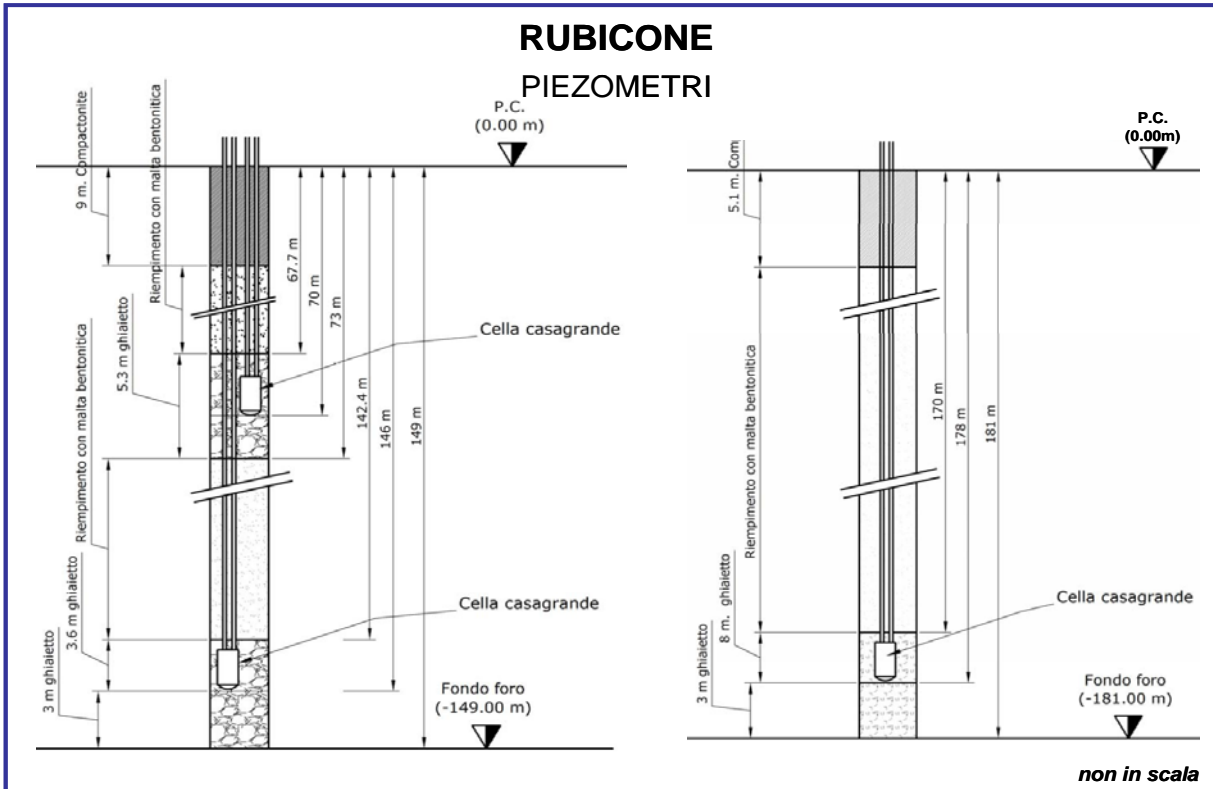


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

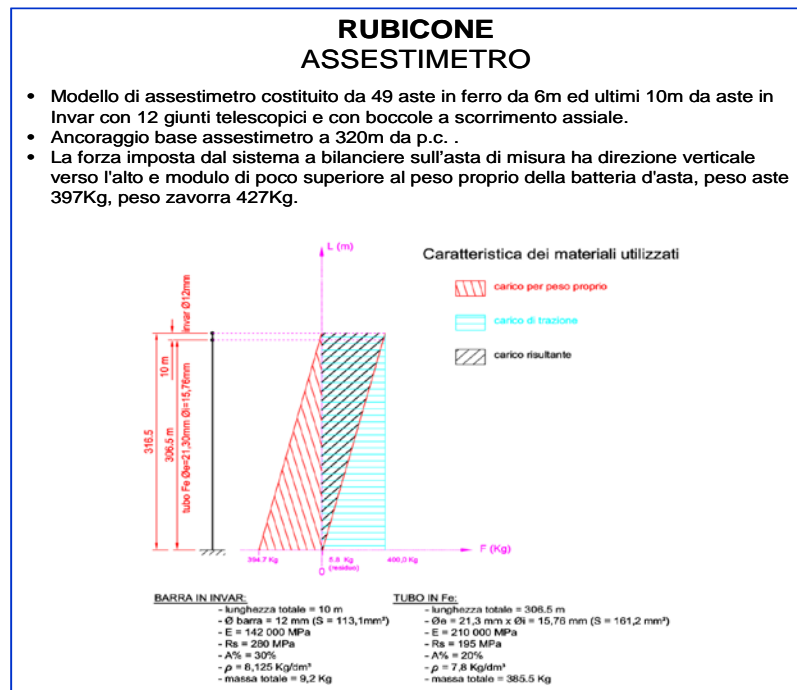


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

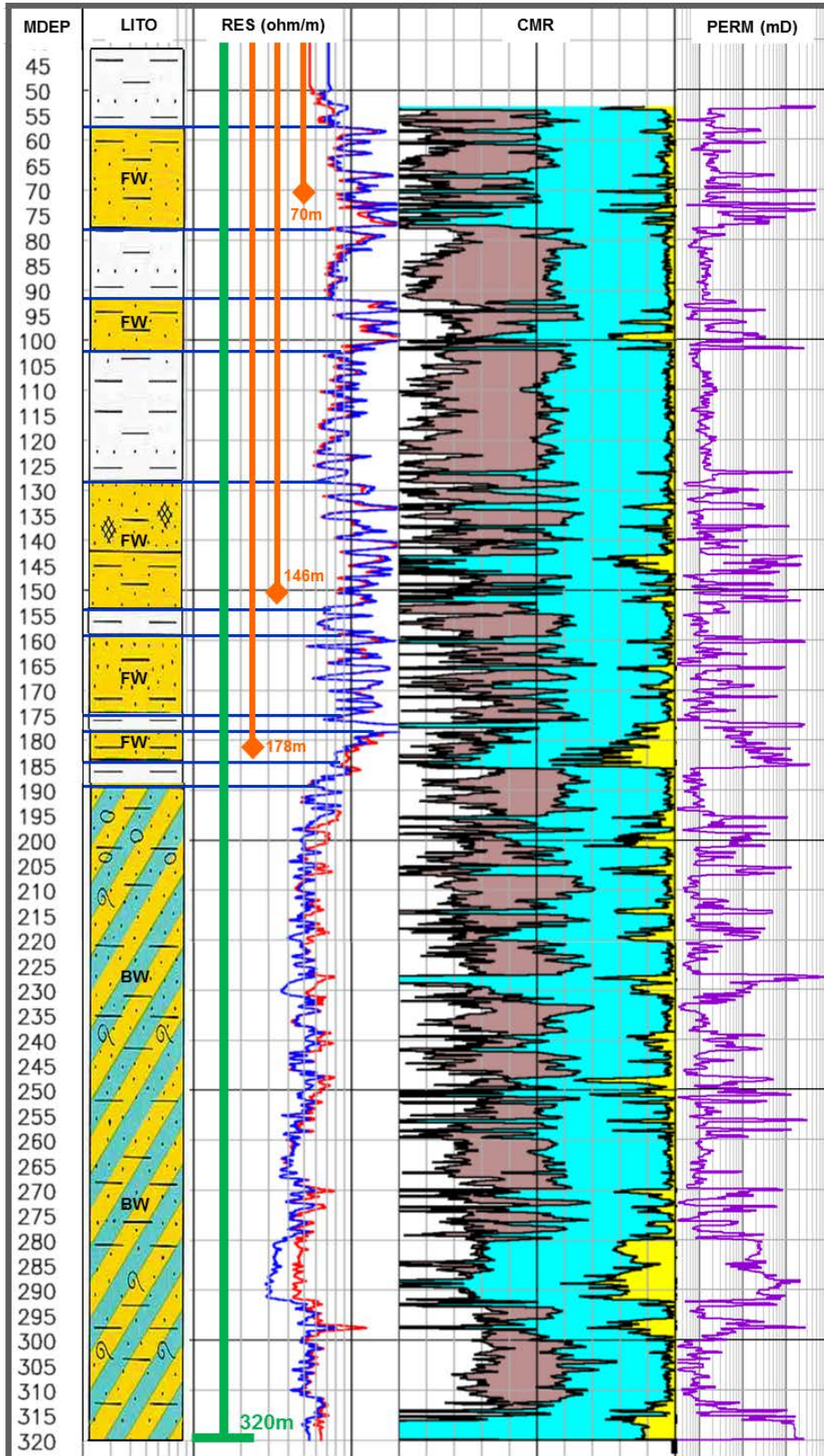


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

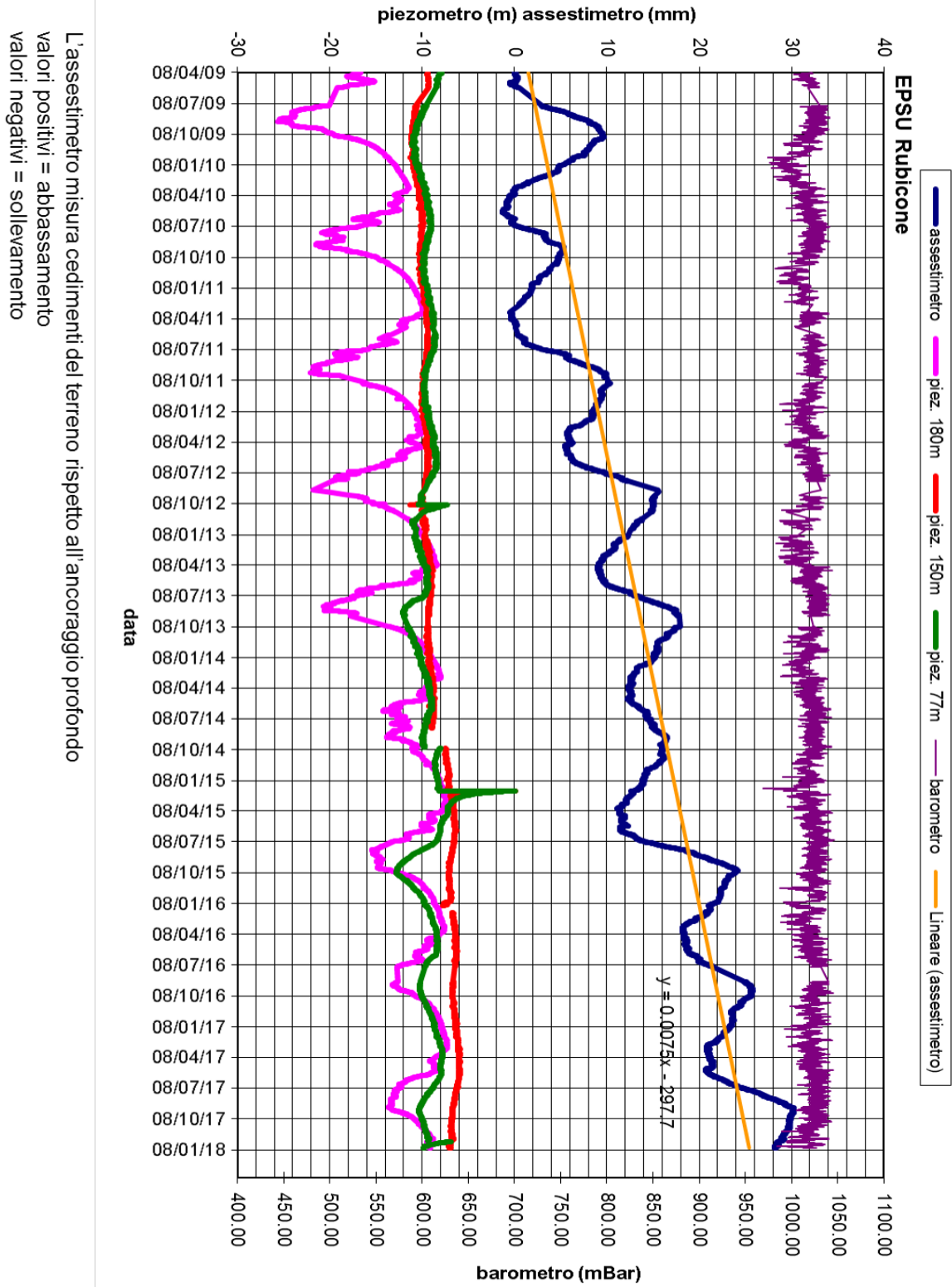
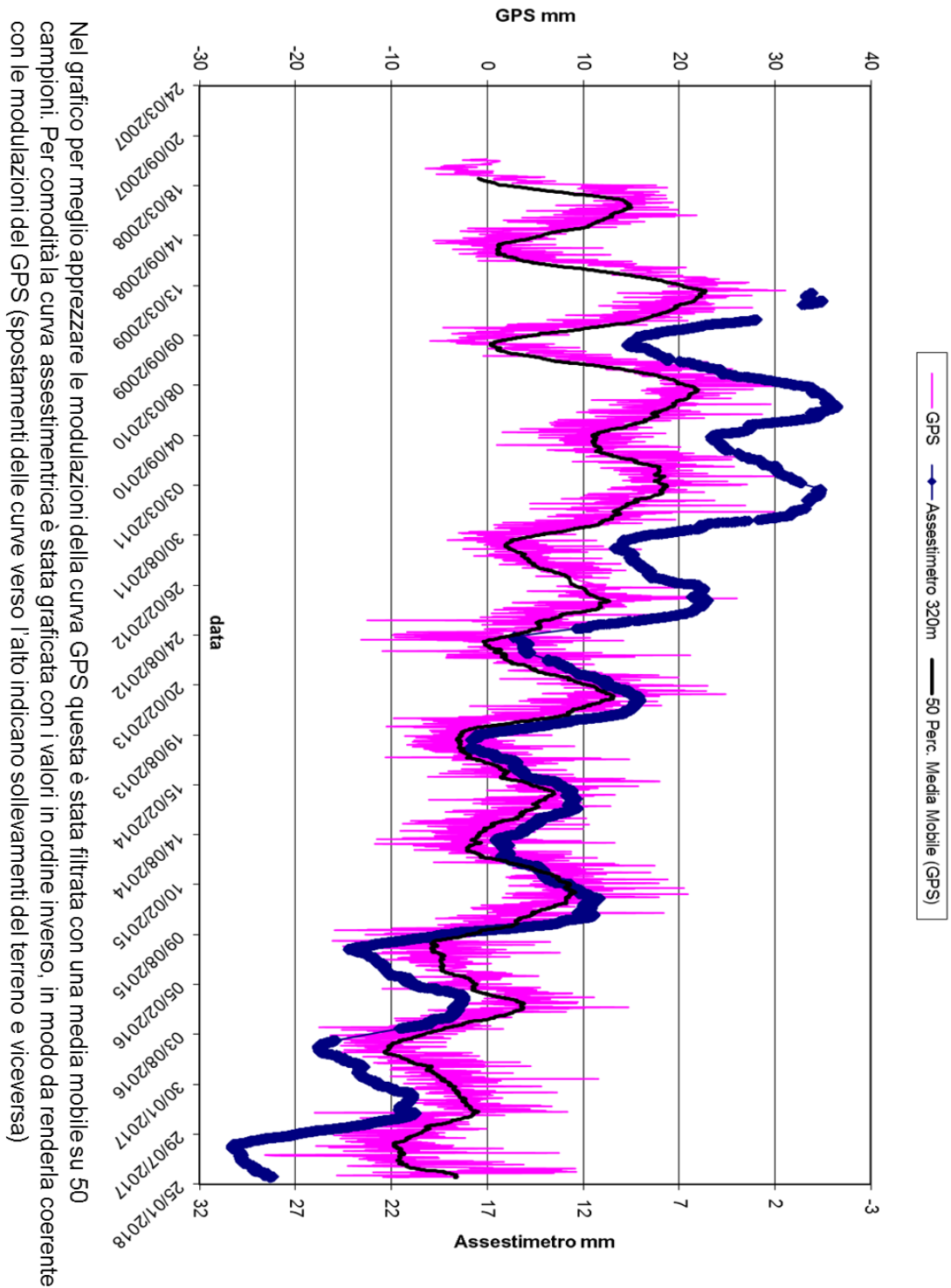


Figura 6B - Stazione *EPSU* di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche dal 2008 al 2018 inclusi i dati barometrici

**RUBICONE - Confronto GPS ed assestimetro profondo**



**Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto 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 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 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 falda. 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 Casagrande, 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.

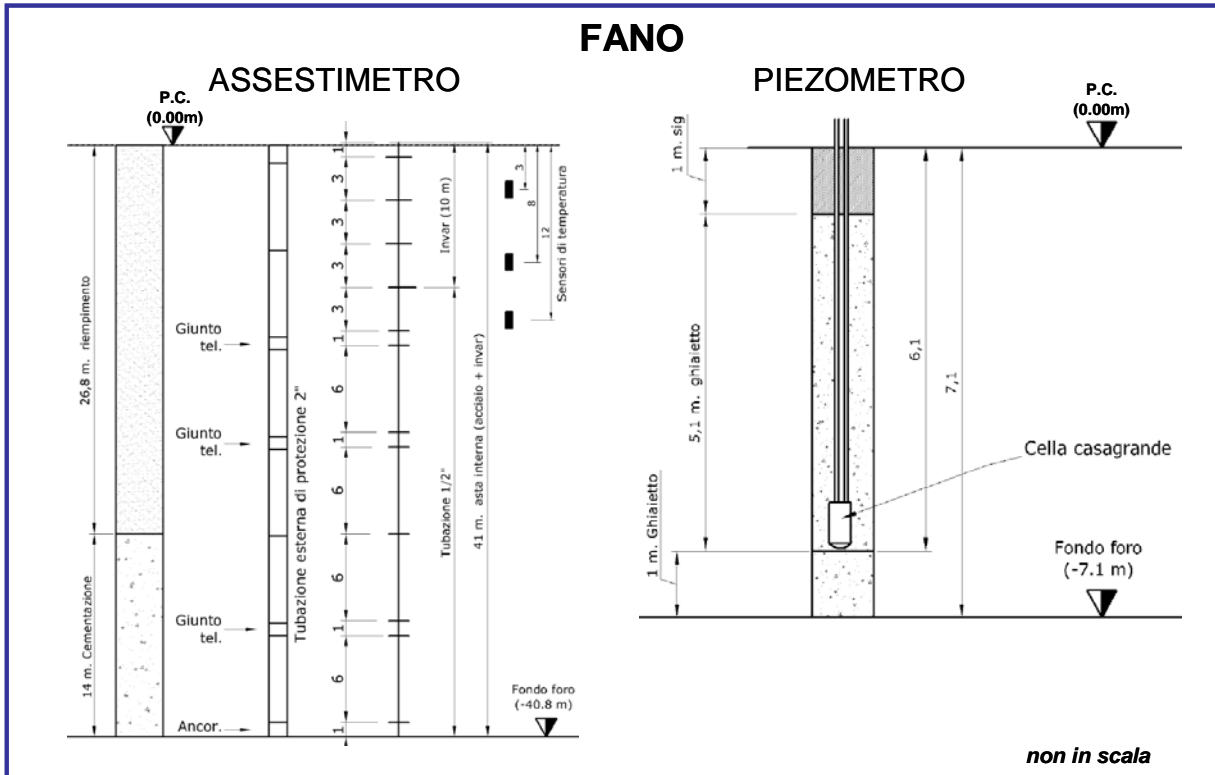


Figura 8B - Schema della stazione EPSU di Fano

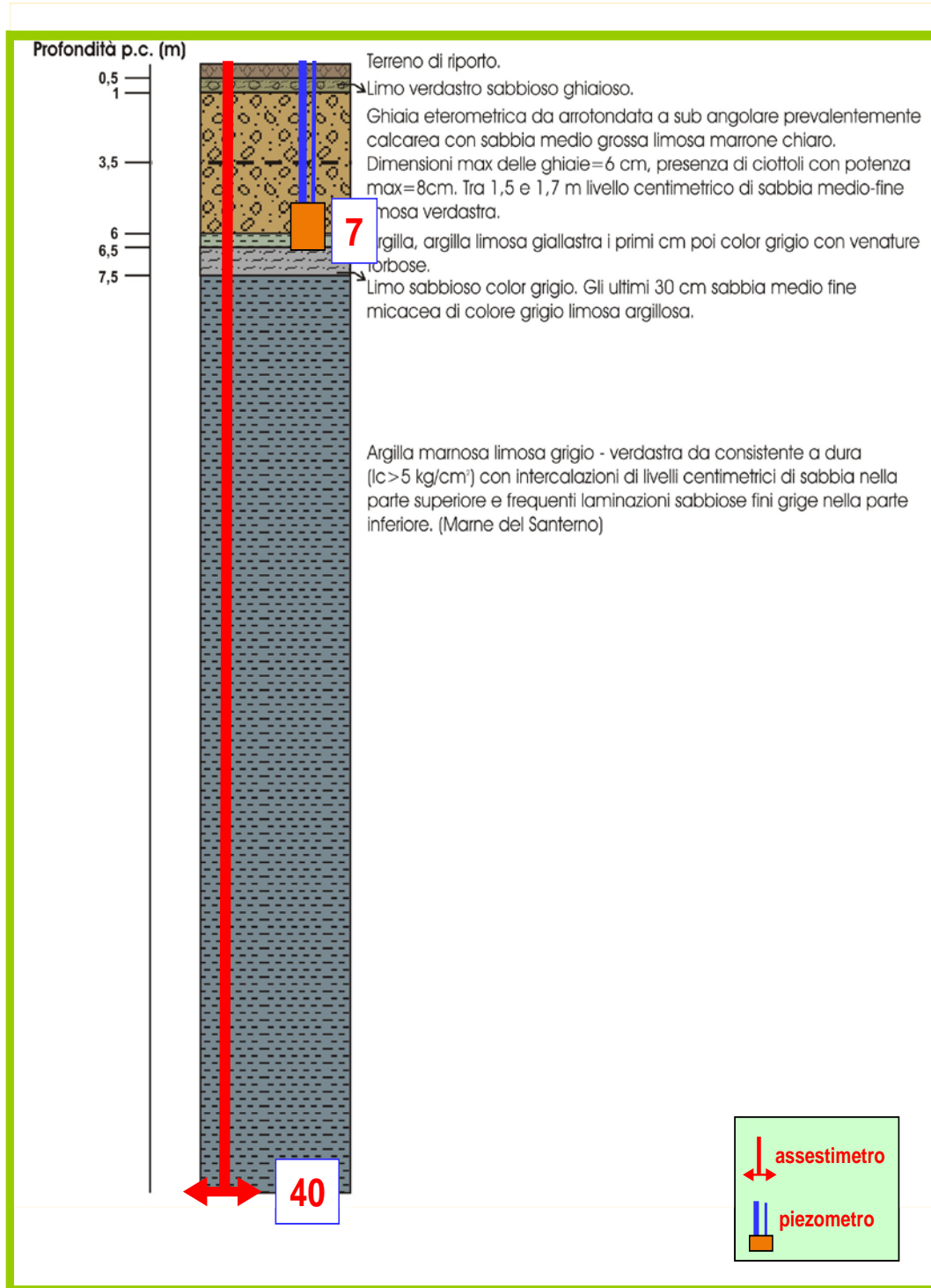


Figura 9B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione *EPSU* di Fano

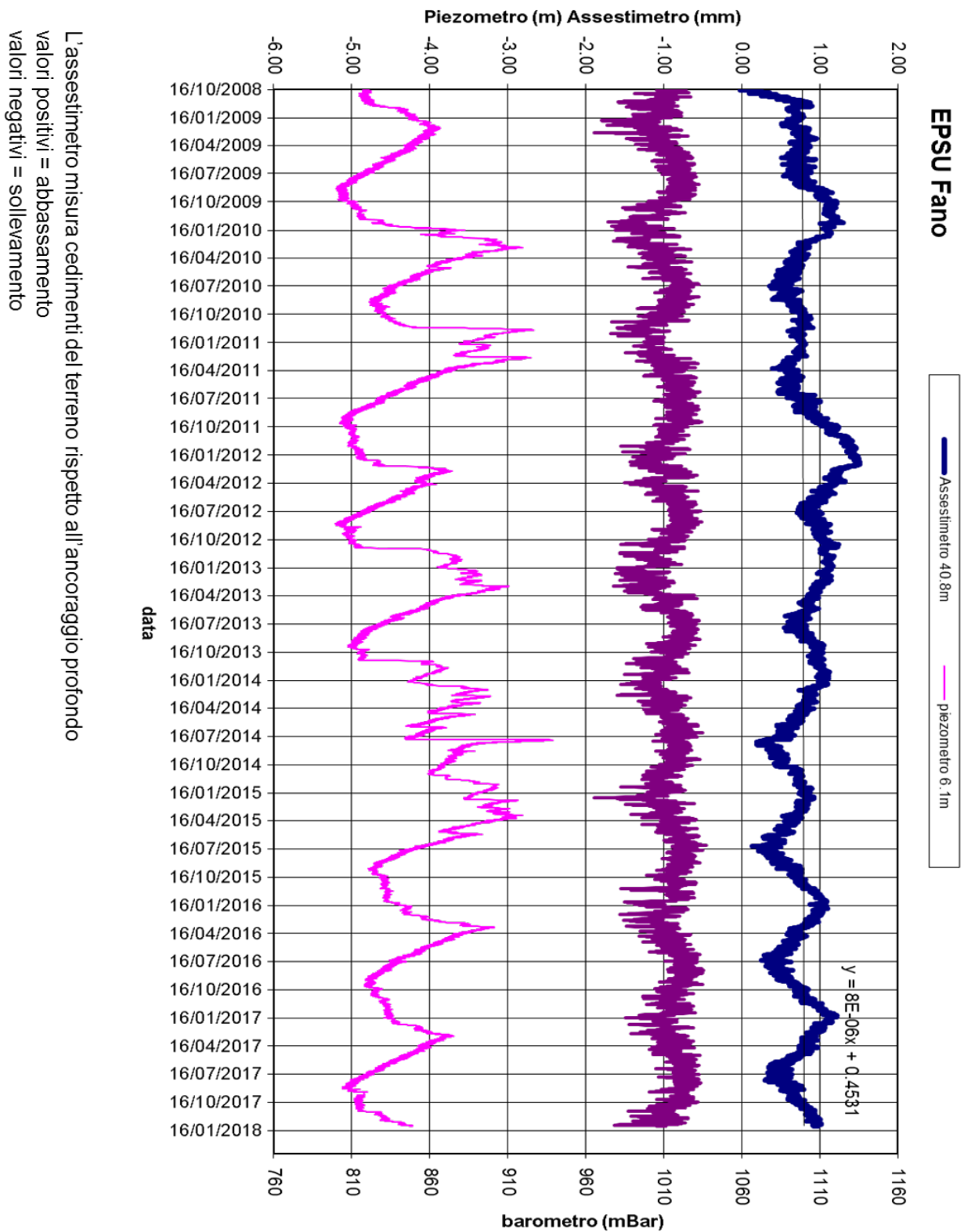
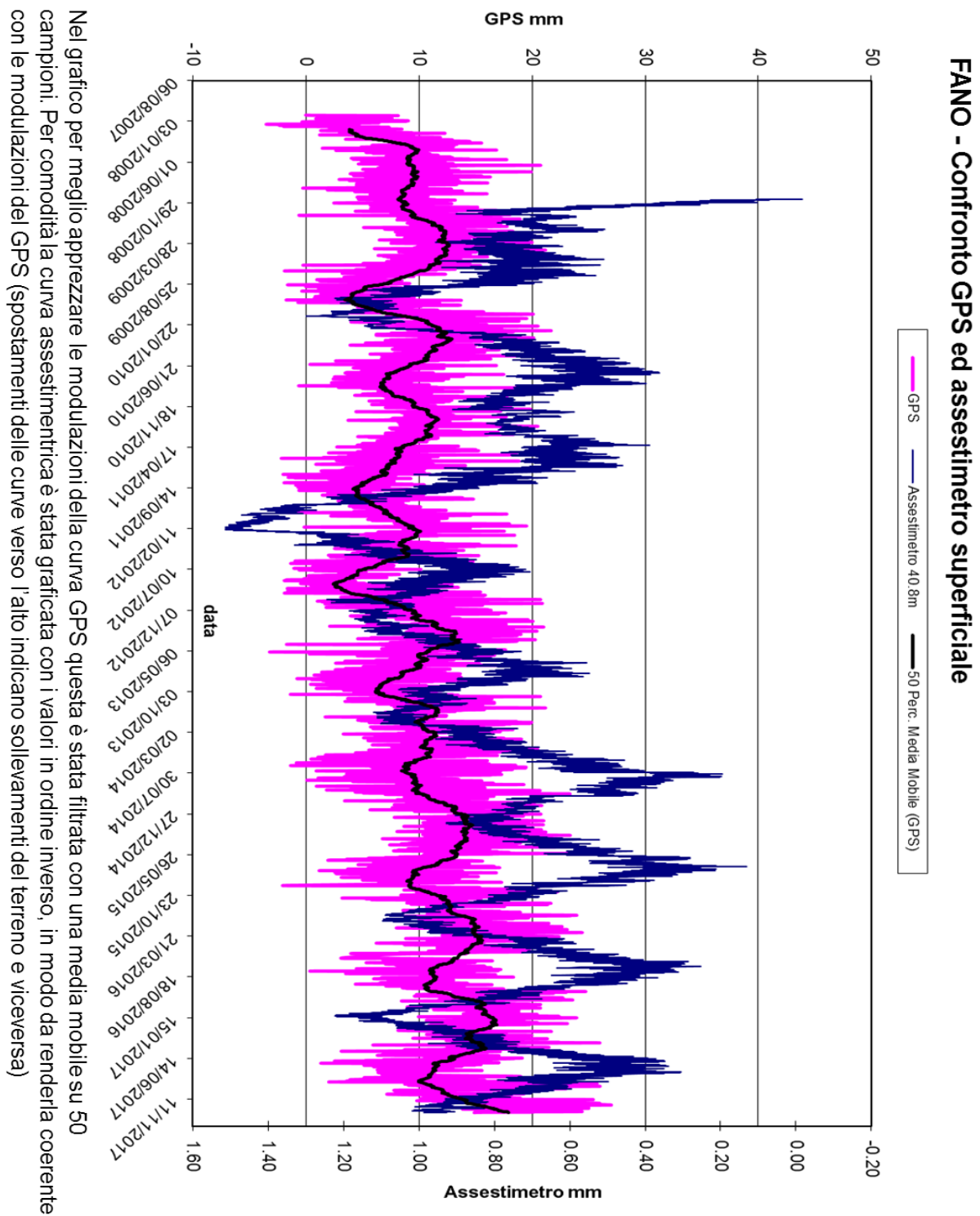


Figura 10B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018



**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:**

- assestimetro - quota bottom: 40,3 m da p.c.
- piezometro a cella singola – quota cella: 22 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,
- 8 maggio 2009 - 31 dicembre 2014 una misura ogni 6 ore.

Nei periodi 7 ottobre 2011 - 2 novembre 2011 e 3 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'assestimetro 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'assestimetro 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'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento 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 assestimetriche è caratterizzata da una curva ad andamento oscillatorio



molto ben correlabile con le variazioni di livello della falda d'acqua monitorata 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 15 B):

- 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 - si è in grado di controllare l'attendibilità delle misure.

Nel dicembre del 2017 è stata fatta l'ultima manutenzione ordinaria della stazioni e sono stati controllati anche i piezometri. In tale occasione si è misurato manualmente con un frea-timetro il livello della falda per verificare la qualità delle misure registrate dai trasduttori. Le

differenze riscontrate sono risultate sempre molto piccole, dell'ordine di 2-3 cm, per cui i piezometri sono da considerarsi affidabili e funzionanti.

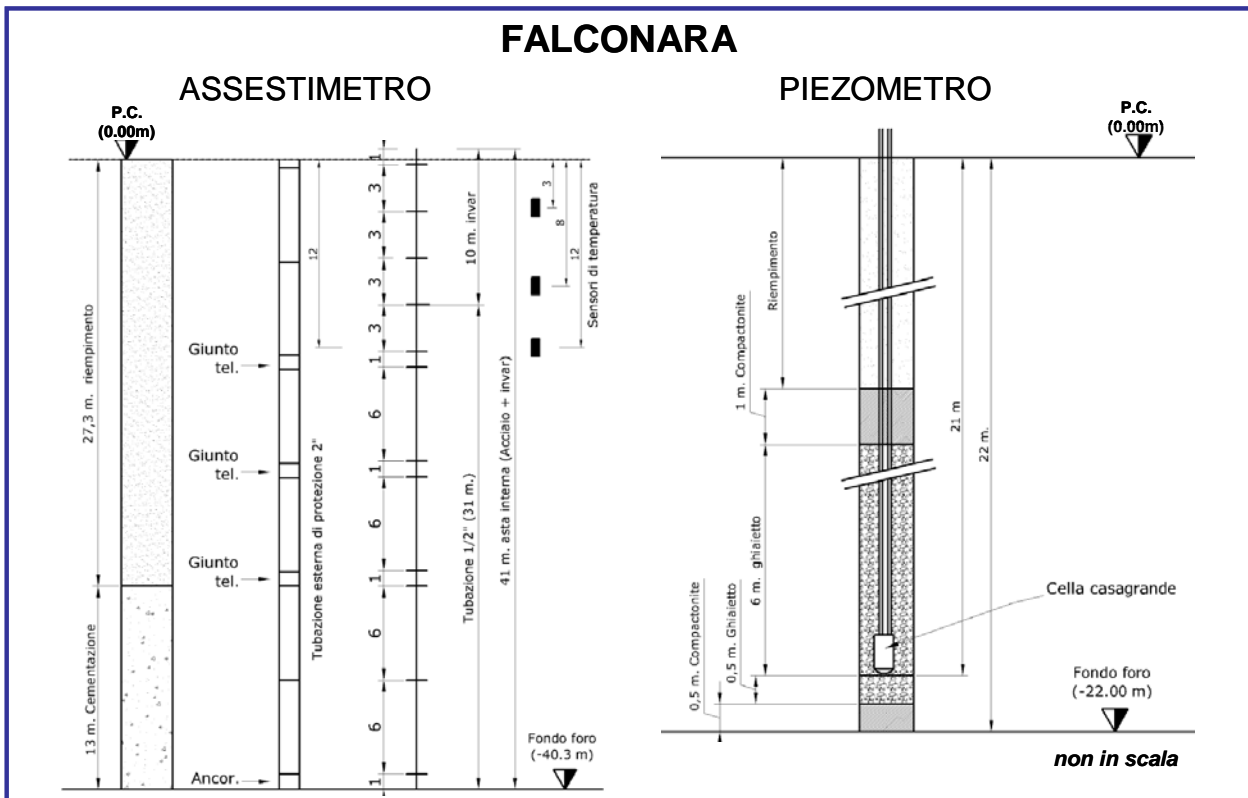


Figura 12B - Schema della stazione EPSU di Falconara

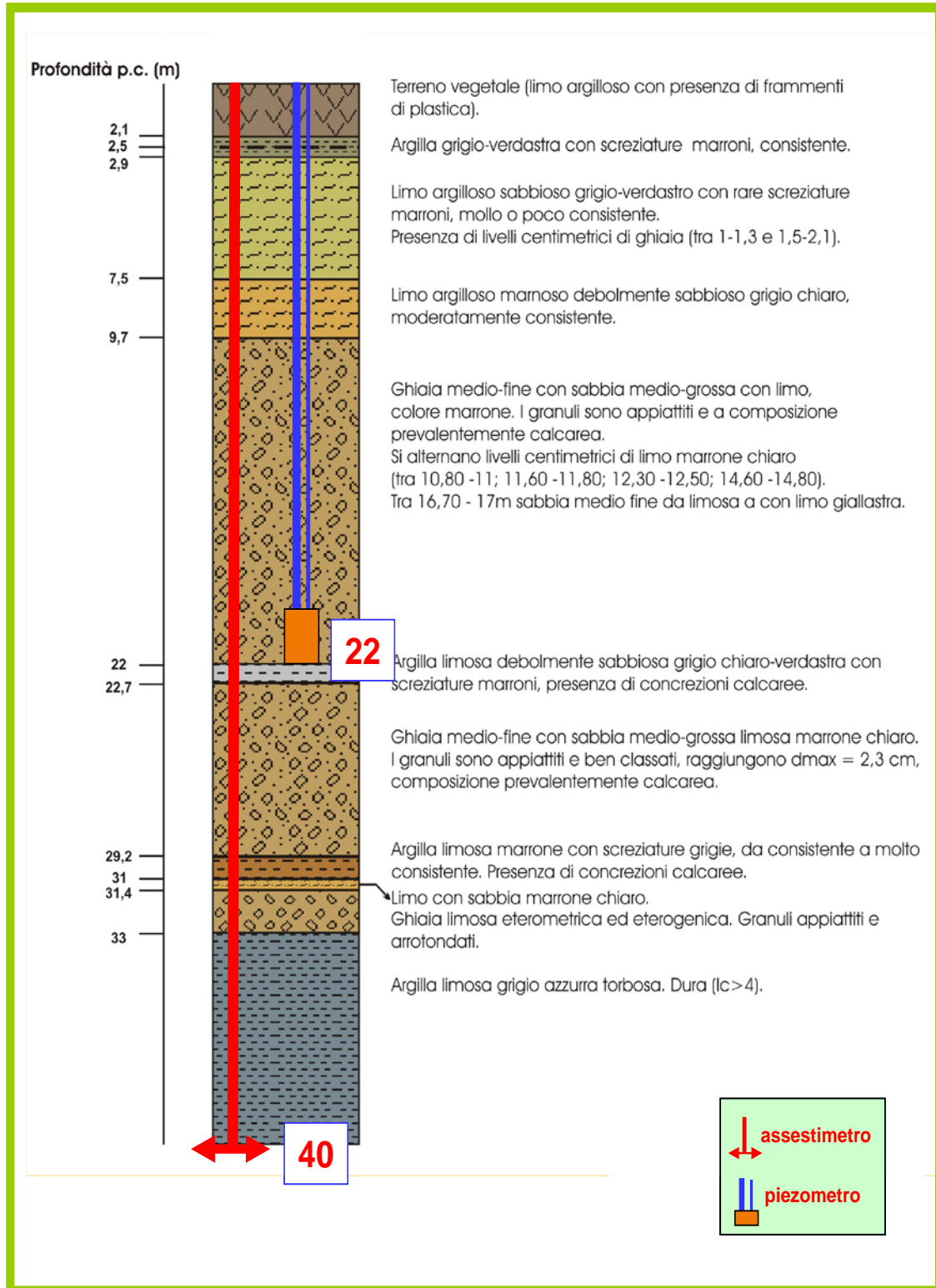


Figura 13B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

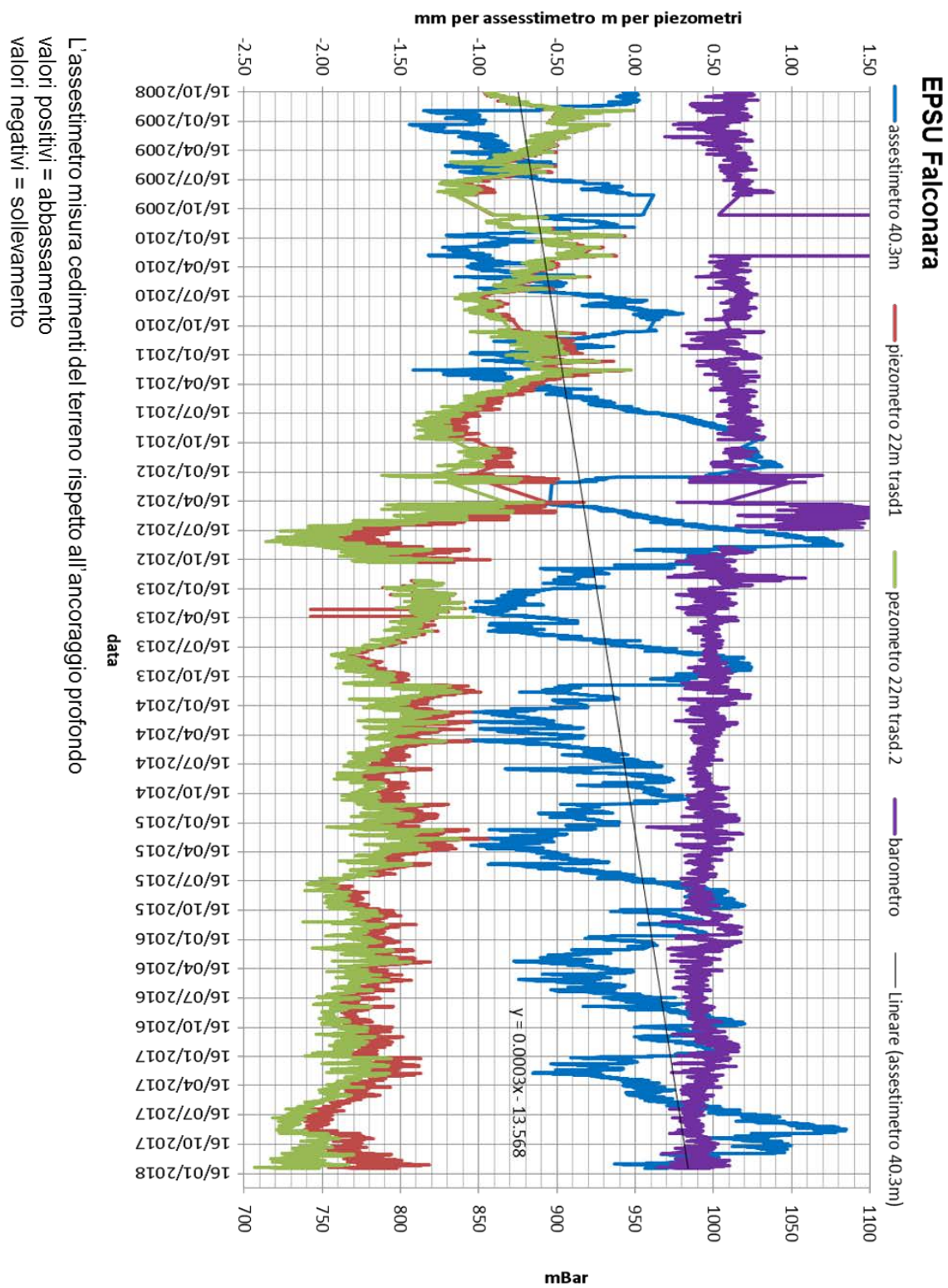
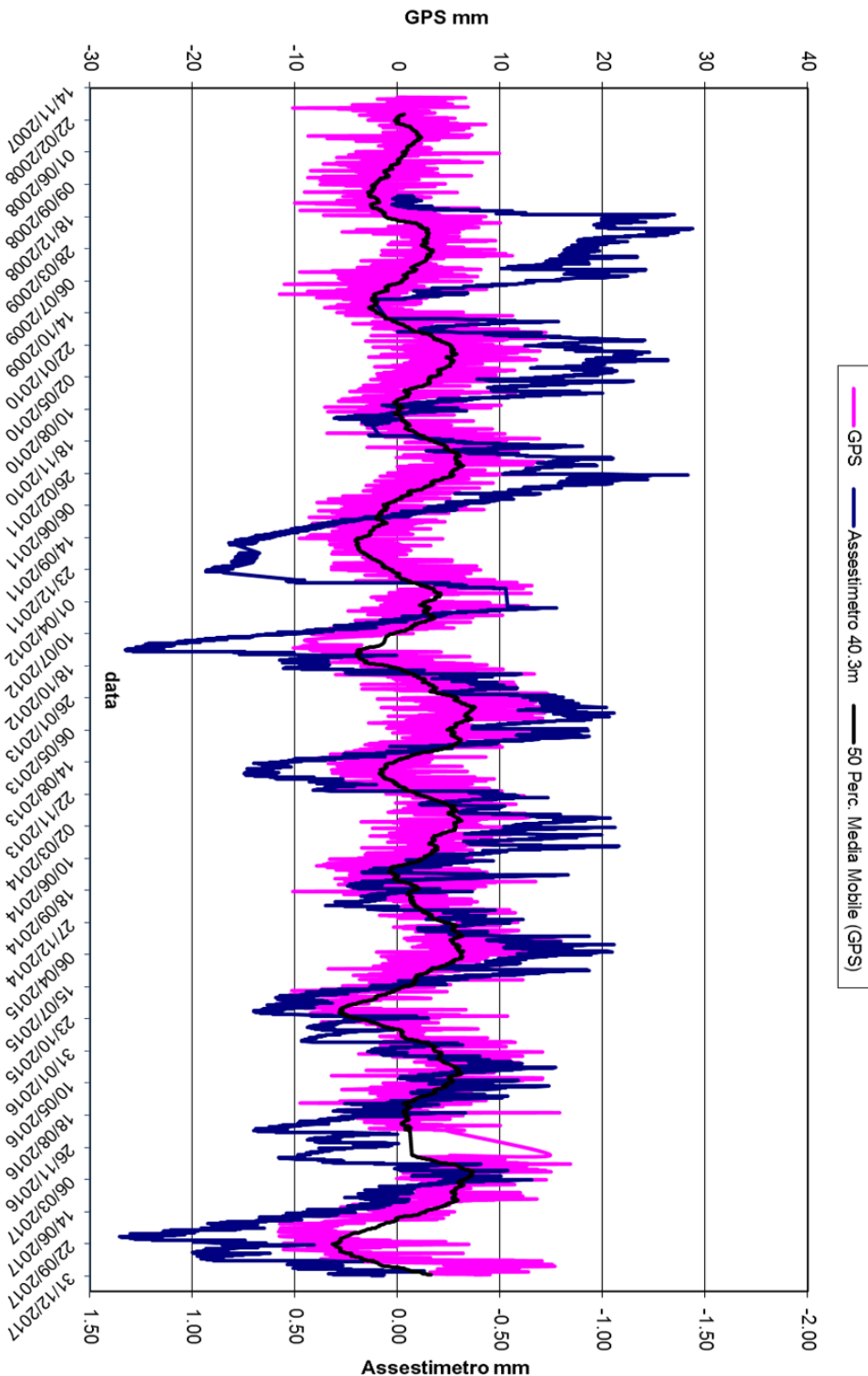


Figura 14B - Stazione *EPSU* di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018

### FALCONARA - Confronto GPS ed assestimetro superficiale



Nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva GPS 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 GPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa)

Figura 15B Stazione EPSU di Falconara: confronto 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).*



## 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	2822	3,1	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