



Campo di CALPURNIA

Aggiornamento al 31/12/18

Il campo di Calpurnia è ubicato nell'offshore Adriatico circa 55 km a NE di Ancona, a una profondità d'acqua di circa 72 m, nella concessione B.C22.AG evidenziata in Figura 1.

| CONCESSIONE | SCADENZA | OPERATORE | TITOLARI | QUOTA | REGIONE |
|-------------|------------|-----------|----------|-------|---------|
| B.C22.AG | 31/03/2018 | Eni | Eni | 100% | Marche |

Il giacimento è costituito da una blanda anticlinale con asse principale orientato NW-SE e si estende per circa 7 km². La serie mineralizzata è compresa tra 570 m e 1015 m e interessa due diverse formazioni Pleistoceniche: F.ne Ravenna e F.ne Carola (Figura 2).

Il campo è stato scoperto nel 1983 con la perforazione del pozzo Calpurnia 1; per delimitare la struttura sono stati perforati, in seguito, altri 2 pozzi, Calpurnia 2 nel 1984 e Calpurnia 3 nel 1994. Nel giugno 1998 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente la realizzazione della piattaforma di Calpurnia con la perforazione di 5 pozzi e la posa del relativo *sealine* di collegamento. Nel documento SIA si riportava un profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento del maggio 1998. Tale profilo prevedeva riserve a vita intera pari a 1980 MSm³, producibili in 16 anni con un picco di produzione giornaliera di 1000 kSm³/g. Per lo studio di subsidenza, riportato nel SIA, è stato utilizzato un modello geomeccanico del tipo Geerstma cilindrico e un profilo di produzione ottenuto con un modello *Eclipse* del febbraio 1996 che prevedeva invece il recupero di 1536 MSm³ di gas in 9 anni. Detto modello geomeccanico stimava dopo 9 anni dall'inizio della produzione un valore massimo di subsidenza pari a 8 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento); alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) risultava estendersi per circa 2.5 km verso la costa.

Per tale previsione erano stati utilizzati i parametri geomeccanici che, con le informazioni disponibili a tale data, venivano considerati come più rappresentativi del comportamento della roccia serbatoio, in particolare:

- compressibilità uniassiale $C_m = 1.00 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
- coefficiente di Poisson $\nu = 0.33$.



In seguito al Decreto VIA n° 4170 del 15/11/99 che approvava il programma lavori presentato, nel 1999 si è sviluppato il campo perforando cinque nuovi pozzi (Calpurnia 4, 5, 6, 7 e 8) da una piattaforma di tipo BEAF. La produzione è stata poi avviata nell'ottobre del 2000 con una portata iniziale di circa 1400 kSm³/g.

Nel maggio 2007 è stata fatta una revisione degli studi di giacimento (statico e dinamico) dei campi del *Clara Complex* (Clara Est, Clara Nord, Calpurnia) e di Calipso per valutare anche possibili fenomeni d'interferenza idraulica e meccanica fra detti campi.

A tale proposito si è proceduto a:

1. costruire un unico modello statico di giacimento per i 4 campi dell'area; modello che è stato esteso anche agli acquiferi idraulicamente connessi ai livelli produttivi;
2. simulare il comportamento dinamico di tali campi con un unico modello *Eclipse* sia per calibrarne il modello statico, sia per tener conto di possibili interferenze dinamiche fra loro. Per la calibrazione si sono utilizzate le informazioni acquisite durante lo sviluppo e tutta la loro storia produttiva (aggiornata al 31/12/06).

Nel caso di Calpurnia (rel. *Eni-INPE n° 066b-07 del maggio 2007*) tale revisione ha portato a un aumento del 32% del GOIP totale rispetto al volume inizialmente stimato (*GOIP studio statico dell'ottobre 1998 pari a 3710 MSm³, GOIP revisione studio statico del maggio 2007 pari a 4900 MSm³*). Il nuovo profilo di produzione ha previsto, inoltre, un aumento delle riserve producibili a vita intera del 13% (i.e. 2231 MSm³ al 2016) rispetto alla stima iniziale del maggio 1998. Tale incremento delle riserve è risultato però inferiore a quello calcolato per il GOIP per la presenza di un acquifero attivo in alcuni livelli delle formazioni PLQ2 e PLQ1 con conseguente previsione di una chiusura anticipata di alcune *string* completate negli stessi. Per ottimizzare il recupero delle riserve restanti, nel 2010 è stata fatta un'altra revisione dello studio statico e dinamico di giacimento (rel. *Eni-INPE n° 16-10 del maggio 2010*) che ha individuato nei *side-track* dei pozzi Calpurnia 4 e Calpurnia 5 gli interventi necessari a tale scopo. La nuova valutazione del GOIP è stata pari a 4164 MSm³, con una riduzione, quindi, del 15% rispetto a quanto stimato in precedenza (*GOIP del maggio 2007 pari a 4900 MSm³*). Le riserve producibili a vita intera dal campo sono però aumentate del 6% poiché il nuovo profilo di produzione ha previsto di recuperare 2382 MSm³ entro il 2016 per effetto degli interventi proposti sui pozzi Calpurnia 4 e Calpurnia 5.



Tali interventi sono stati eseguiti nel mese di gennaio 2011 con la perforazione dei pozzi side track Calpurnia 4 dirA e Calpurnia 5 dirA che sono entrati in produzione tra febbraio e marzo 2011. La revisione dello studio di giacimento fatta nel marzo 2013 (rel. *Eni-GISE n°04/2013 del 06/03/2013*) allo scopo di aggiornare il modello geomeccanico dei campi del *Clara Complex* e del campo di Calipso, ha sostanzialmente confermato i valori del GOIP e delle riserve stimate con lo studio del maggio 2010: le riserve producibili a vita intera dal campo al 2020 sono risultate, pertanto, pari a 2382 MSm³.

Nel 2015 si sono rivalutate nuovamente le riserve del campo che sono state stimate in 2287 MSm³ producibili al 2017 (rel. *GISE-05/15_campo di Calpurnia–studio di giacimento, maggio 2015*). Si deve, però, osservare che tale volume era di fatto già stato prodotto a fine 2015, per cui nel 2017 è stato realizzato un nuovo studio integrato (geologico, dinamico e geomeccanico) per i campi del *Clara Complex* (Clara Nord, Clara Est e Clara NW, Calpurnia), di Calipso e di Elettra. Sulla base dei risultati degli studi (statico e dinamico) di giacimento fatti nel corso delle varie revisioni sopra descritte, di volta in volta si sono aggiornate le previsioni di subsidenza del campo di Calpurnia e degli altri campi dell'area. A tale proposito si ricorda che nel 2007 è stato realizzato un unico modello geomeccanico a elementi finiti (FEM - Isamgeo) dei campi del *Clara Complex* e del campo di Calipso (rel. *Eni-INPE n° 074-07 del maggio 2007*).

Le simulazioni effettuate con tale modello avevano portato alle seguenti conclusioni:

1. per il campo di Calpurnia il valore di subsidenza massima era risultato pari a 53 cm al 2011. L'incremento di subsidenza massima rispetto a quanto riportato nel SIA del 1998 era da imputarsi principalmente ai seguenti fattori:
 - differenza nei valori dei coefficienti di compressibilità C_m utilizzati per il calcolo, in particolare per il livello PLQ2,
 - aumento dei gross pay considerati,
 - migliore modellazione dell'acquifero circostante;
2. l'estensione verso la costa del cono di subsidenza relativo ai 4 campi (*Clara Complex* e Calipso) era risultata sempre d'entità modesta (max. 6 km in corrispondenza di Clara Est) per la presenza di un limite deposizionale dei livelli mineralizzati situato a SW dei campi di Calipso e Clara Est di cui si dirà con più dettaglio in seguito. La distanza minima tra la costa e la linea d'iso-subsidenza di 2 cm era risultata, pertanto, pari a 32 km.



Nel corso del 2010, nell'ambito della documentazione tecnica (SIA) preparata per l'istanza concernente il progetto di sviluppo della vicina struttura di Elettra, si è aggiornato il modello geomeccanico di tutta l'area al fine di prevedere l'eventuale subsidenza indotta dalla coltivazione dell'insieme dei campi in essa compresi (*Clara Complex, Calipso ed Elettra*). Tale previsione è stata fatta con il modello FEM Isamgeo relativamente a tre diversi scenari di compressibilità (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - agosto 2010*).

Le simulazioni con modello sono state protrate fino al 2054 per tener conto degli effetti dell'evoluzione della pressione nelle zone mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione. Per lo scenario di riferimento (C_m _Med), ritenuto il più probabile, la subsidenza massima prevista per Calpurnia è stata stimata in 43 cm al 2008 e a 42 cm al 2010, fino a ridursi ulteriormente a un valore di circa 38 cm alla fine della simulazione. Per quanto riguarda la distanza dalla costa della curva d'iso-subsidenza di 2 cm, corrispondente alla massima estensione del cono di subsidenza relativo ai 5 campi, questa è risultata essere di circa 32 km. Un ulteriore aggiornamento/taratura del modello geomeccanico del 2010 è stato fatto nel dicembre 2011, previa revisione del modello di giacimento 3D *Eclipse* dei campi dell'area (*Clara Complex, Calipso ed Elettra*). Quest'ultima revisione si è resa necessaria per tener conto sia del nuovo progetto di sviluppo "Clara NW" che ipotizzava la perforazione di 4 nuovi pozzi in corrispondenza di una culminazione secondaria (NW) di Clara Est, sia dei nuovi dati disponibili a seguito della campagna di *work-over* del 2011 sui pozzi dei campi di Calpurnia e di Clara Nord. Nel caso di Calpurnia il nuovo studio di giacimento non ha portato a sostanziali variazioni per il GOIP e per le riserve rispetto alla valutazione fatta al dicembre 2010. Con questi nuovi studi di giacimento (statici, dinamici e geomeccanici) si sono voluti valutare gli effetti di eventuali interazioni di tipo idraulico e/o meccanico fra campi del *Clara Complex*, di Calipso ed Elettra (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - dicembre 2011*). Nel corso delle simulazioni con modello geomeccanico si sono considerati 3 possibili scenari per il valore del coefficiente di compressibilità (C_m), che a loro volta hanno generato altrettanti scenari previsionali di subsidenza i cui risultati oscillano nell'intorno di un valore medio all'interno di una banda di confidenza.



Nel caso ritenuto più probabile (C_m_Med) la subsidenza massima per il campo di Calpurnia è stata stimata pari a 61 cm al 2017. Per lo scenario (C_m_Upper) più pessimistico e per tutti gli scenari considerati nello studio, la linea d'iso-subsidenza di 2 cm si mantiene sempre a una distanza dalla costa superiore ai 32 km. Nel 2013 è stato nuovamente aggiornato il modello dinamico di giacimento dei campi dell'area (rel. *Eni-GISE n.11/2013: Clara Complex – campi: Calipso-Calpurnia-Clara Est-Clara Nord-Elettra. Aggiornamento del modello di giacimento per modello geomeccanico. Scheda Riassuntiva aprile 2013*) a supporto del nuovo progetto di sviluppo “Clara SE”, che prevede l'installazione di una nuova piattaforma di produzione e la perforazione di due nuovi pozzi (Clara Est 14D e Clara Est 15D). Anche in quest'ultimo caso l'aggiornamento è stato fatto tenendo conto delle possibili interazioni di natura idraulica e meccanica fra i campi stessi.

Un nuovo modello geomeccanico 3D a elementi finiti (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, (con il nuovo sviluppo “Clara Sud-Est”), Calipso ed Elettra – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary – settembre 2013*) è stato poi finalizzato per valutare l'entità della subsidenza e l'estensione del relativo cono indotti dalla produzione complessiva dei campi sopracitati. Ancora una volta le simulazioni fatte hanno preso in esame tre diversi scenari di compressibilità. Nel caso ritenuto più probabile (scenario di compressibilità C_m_Med), la subsidenza massima prevista per tutta l'area in esame si verifica in corrispondenza del campo di Clara Nord ed è pari a circa 68 cm al 2021; tale valore si riduce a circa 62 cm alla fine della simulazione. Per quanto riguarda il campo di Calpurnia, la subsidenza massima (nel caso C_m_Med) è risulta pari a 54 cm al 2021. Lo studio è stato, poi, protratto fino al 2065 (fine simulazione) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

Anche in questo nuovo aggiornamento del modello geomeccanico la linea di iso-subsidenza dei 2 cm si è mantenuta per tutti gli scenari considerati a una distanza dalla costa sempre superiore a 32 km. Nel 2017 è stato eseguito un nuovo studio integrato per un nuovo modello (statico e dinamico) dei giacimenti dell'area del Clara Complex, Calipso ed Elettra (*Eni-GISE 24/2017 Clara Complex – Scheda integrativa all'aggiornamento dello studio di giacimento per geomeccanica - Scheda riassuntiva –dicembre 2017*) che aggiorna le riserve di Calpurnia a 2316 MSm³ producibili al 2022.



In Figura 3 è riportato l'andamento storico della produzione di gas del campo (kSm^3/g), e di acqua (m^3/g). In Figura 4, Figura 5 e Figura 6 è riportato, invece, il confronto tra la produzione reale annuale e cumulativa e quella prevista dal modello Eclipse 2017.

Al 31/12/2018 la produzione cumulativa del campo è pari a 2296 Mm^3 .

Nella Figura 7 è presentato il confronto del profilo di pressione calcolato dal modello *Eclipse* del 2017 con le pressioni statiche misurate in un livello rappresentativo del campo (livello PLQ1-C). Si evidenzia un buon accordo tra le pressioni misurate e quelle simulate.

A seguito del nuovo modello di giacimento si è aggiornato anche il modello geomeccanico (rel. *Eni-EORG 07/2017: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - dicembre 2017*).

Per le simulazioni del modello geomeccanico si sono considerati 3 diversi scenari di produzione:

- **DO NOTHING:** prevede di proseguire lo sviluppo del giacimento mediante i completamenti aperti a fine *history match* (dicembre 2017), senza ulteriori interventi;
- **CLPS5:** considera lo sviluppo del campo di Calipso con un nuovo pozzo (Calipso 5 dal 01/09/2019);
- **CLPS6:** sviluppo *full field* che prevede due pozzi su Calipso (Calipso 5 dal 01/09/2019 e Calipso 6 dal 01/11/2019) e lo sviluppo del giacimento di Clara Est con due pozzi (Clara Est 14 dir e Clara Est 15 dir) in produzione dal 01/02/2021.

I risultati del nuovo studio, per il campo di Calpurnia, mostrano per tutti e tre gli scenari di *forecast* un valore di subsidenza massimo di 14 cm al 2015 (Figura 8), in leggero *rebound* alla fine della simulazione (2061). Per tutti gli scenari considerati nello studio, inoltre, la massima estensione della subsidenza prevista - corrispondente alla curva di iso-subsidenza dei 2 cm - si mantiene a oltre 29 km dalla costa e dalla città di Ancona, per l'intera durata della simulazione di tutti gli scenari di produzione considerati (Figura 8). La Tabella1 riporta per i cinque campi considerati e per i 3 scenari di *forecast* considerati, i valori massimi di subsidenza ottenuti e le date alle quali si conseguono.

**Tabella 1– Valori massimi previsti di subsidenza alle date sottoindicate**

| | Clara Nord | Calpurnia | Elettra | Clara Est | Clara NW | Calipso |
|--------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| DN | 34 cm (2016) | 14 cm (2015) | 11 cm (2061) | 69 cm (2061) | 81 cm (2038) | 57 cm (2022) |
| CLPS5 | 34 cm (2016) | 14 cm (2015) | 11 cm (2061) | 69 cm (2061) | 81 cm (2038) | 84 cm (2026) |
| CLPS6 | 34 cm (2016) | 14 cm (2015) | 11 cm (2061) | 129 cm (2037) | 97 cm (2061) | 85 cm (2026) |

Il fatto che tutti gli studi geomeccanici sino ad ora eseguiti per valutare i possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica fra i vari campi considerati concordino nel prevedere che il fenomeno della subsidenza si esaurisca a grande distanza dalla costa (circa 29 km), ha una spiegazione nel particolare assetto geologico dell'area stessa, come del resto già accennato in precedenza. Tale assetto, rappresentato nello *sketch* stratigrafico-strutturale di Figura 9 e basato su un'interpretazione sismica controllata con dati di pozzo, definisce uno schema di rapporti verticali e laterali tra le formazioni che costituiscono i giacimenti (reservoir e copertura) e il substrato che limitano l'estensione del fenomeno subsidenziale verso costa. Infatti, 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 rappresenta un'importante barriera idraulica verso costa. Il substrato dell'offshore anconetano presenta, inoltre, una successione carbonatica pre-pliocenica posta talora a poche centinaia di metri di profondità – (pozzo Brezza 1) che localmente affiora sulla costa (promontorio M.te Conero) in corrispondenza di alti strutturali appenninici, mentre la successione terrigena di copertura è relativa a intervalli stratigrafici differenti dalle zone reservoir del *Clara Complex* e campi limitrofi. Tutto ciò limita sensibilmente la possibilità che si possa verificare una depressurizzazione e conseguente compattazione dei sedimenti sulla costa e nelle fasce antistanti al litorale.

E', pertanto, del tutto comprensibile che

- sia per la presenza di tale barriera idraulica di tipo sedimentologico-strutturale interposta tra il complesso dei giacimenti in esame e la costa,
- sia per l'elevata distanza dei giacimenti stessi dalla costa (ad es. 35 km per Calipso),

in tutte le previsioni il fenomeno di subsidenza si esaurisca rapidamente in direzione della costa e, quindi, la distanza del cono di subsidenza dalla costa stessa risulti elevata (almeno



29 km). Tra la fine del 2007 e l'inizio del 2008 è stato eseguito un rilievo batimetrico multi-beam di un'area (superficie 1662 km²) comprendente i campi del *Clara Complex*, di Calipso ed Elettra. Pur in presenza di un andamento irregolare del fondale marino, tale rilievo ha consentito di evidenziare per Calpurnia una zona di disturbo arealmente limitata e coincidente, approssimativamente, con la zona di culmine del giacimento.

Tale disturbo raggiunge circa 35 cm sul fondale (Figura 10 - rel. Eni - *Università di Urbino dell'agosto 2008 trasmessa a MATTM in data 11/11/08- prot. UGIT ET/mv 1410*), valore che può considerarsi riprodotto in modo soddisfacente dal modello di subsidenza del 2017 (circa 12 cm al 2008), considerando le incertezze insite nel metodo di misura batimetrico. Un nuovo rilievo batimetrico, da confrontarsi con quello base del 2008 è in corso di programmazione.

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

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

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

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

Tale rete è suddivisa nelle seguenti aree di attività:

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



- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.

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

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti, a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione, determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. Nel tratto di costa da Pesaro a P.to San Giorgio, antistante alla piattaforma di Calpurnia, con l'acquisizione della campagna 2017 sono in totale disponibili 7 campagne di livellazione fatte negli anni 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2014 e 2017.

In Figura A viene rappresentato l'andamento altimetrico lungo la tratta Pesaro – P.to Sant'Elpidio durante il periodo 2006-2017.

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

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

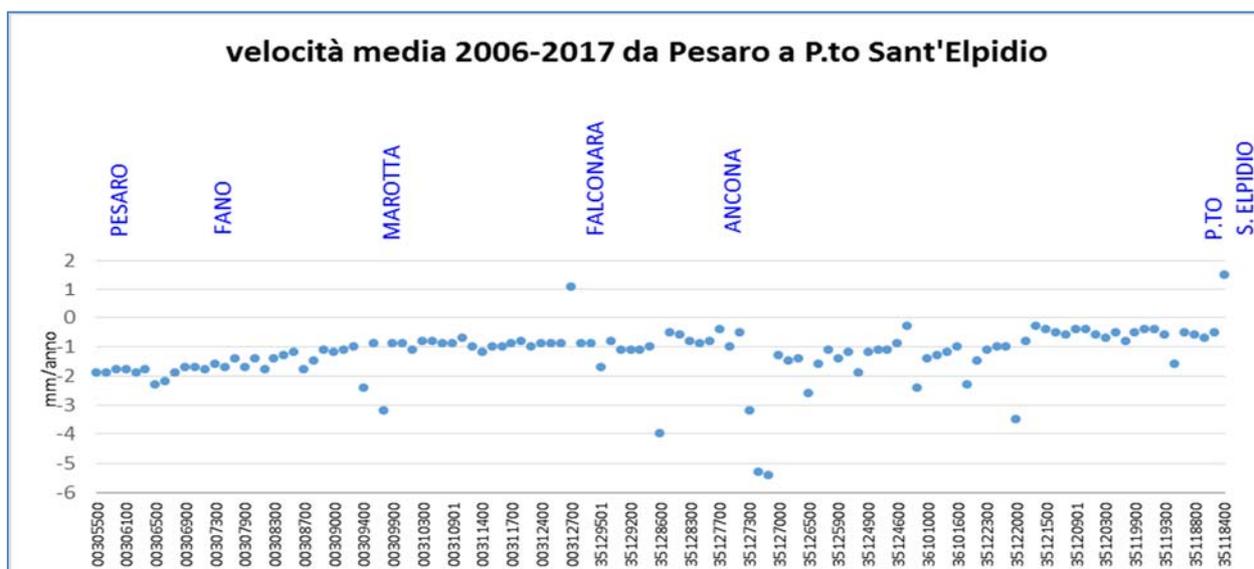
Al fine d'ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori, come di seguito specificato.



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

- classe 4: include i capisaldi con $V_a \geq 10$ 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).

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



L'elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 2006-2017 mostra per l'area in esame, pur nell'ambito di un quadro di generale ma leggero abbassamento (Figura A), una marcata stabilità altimetrica a partire da Fano fino a P.to S. Giorgio: si consideri che il 93% dei punti analizzati ricade nella classe 1 con una media pari a 1.6 mm/a.

I capisaldi per i quali si osservano alte velocità d'abbassamento (es. 5.4 mm/a nella zona di Ancona), 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.

¹ 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.



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 (ottobre 2018) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 11).

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). Nel corso del 2018, sono state installate due nuove postazioni CGPS, entrambe nella configurazione S.S.U. sulle postazioni di Pomposa (ACPO – installata a settembre 2018) e di Po di Tolle (POTO – installata nel mese di luglio 2018). Una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, tutte le nuove stazioni entreranno 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 Calpurnia, certificati fino al 2016 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 31/12/2018 (Figura 12), si sono utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati come mostrato in Tabella 2.

Tabella 2 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2016

| 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 |
| Calpurnia | 17.90 | 22.39 | -2.05 | 17.88 | 22.73 | -3.81 | 0.02 | -0.34 | 1.76 |

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



certifica tali dati con cadenza biennale. L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine di poter disporre di un numero sufficiente di osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza sulle misure e per poter filtrare il "rumore" che per piccole velocità di subsidenza è dello stesso ordine di grandezza del valore del fenomeno fisico osservato. Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, quindi, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori di 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*). Come anticipato nella precedente relazione, le elaborazioni dei dati CGPS, sono state effettuate utilizzando il sistema di riferimento ITRF2014 con il *software* BERNESE 5.2.

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 Calpurnia, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore ai 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale² misurata pari a -1.02 mm/a (Figura 12, Figura 14), senza variazioni significative rispetto al valore riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-1.4 mm/a al 2017).

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 13).

In particolare:

- periodo che va dall'installazione del CGPS a settembre 2008, in cui la velocità media di subsidenza totale di circa -24.18 mm/a;
- periodo settembre 2008 - gennaio 2014, in cui la velocità media di subsidenza totale è pari a circa -4.91 mm/a, con una netta diminuzione della velocità di subsidenza;
- periodo da gennaio 2014 a dicembre 2018, che presenta invece una inversione di tendenza, con un risollevarimento (*rebound*) mediamente dell'ordine di 4.43 mm/a.

Le elaborazioni delle nuove serie storiche sono state influenzate sia dal cambio del sistema di riferimento (da ITRF2008Igb08 a ITRF2014) sia dall'utilizzo della nuova release del software scientifico Bernese (da 5.0 a 5.2). Entrambe le condizioni hanno introdotto modeste variazioni nelle velocità medie pregresse, dovute anche al ricalcolo delle serie storiche delle stazioni di riferimento. In particolare, le verifiche effettuate hanno mostrato che tali condizioni possono determinare un aumento della velocità di subsidenza dell'ordine di 0.5 mm/anno, anche sulle serie storiche delle stazioni di riferimento.

Si sono, poi, confrontate le previsioni di subsidenza del modello geomeccanico del 2017 con le misure di subsidenza totale² rilevate dal CGPS senza che quest'ultime siano state depurate dalla componente di subsidenza naturale.

² La "subsidenza totale GPS" 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.



Per il campo di Calpurnia, si può notare come le previsioni modellistiche siano in accordo con l'andamento misurato dal CGPS (Figura 15).

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza e i monitoraggi fatti da Eni consentono di escludere che l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione di gas dai campi del *Clara Complex* (in particolare da Calpurnia), dal campo di Calipso e da quello di Elettra 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.

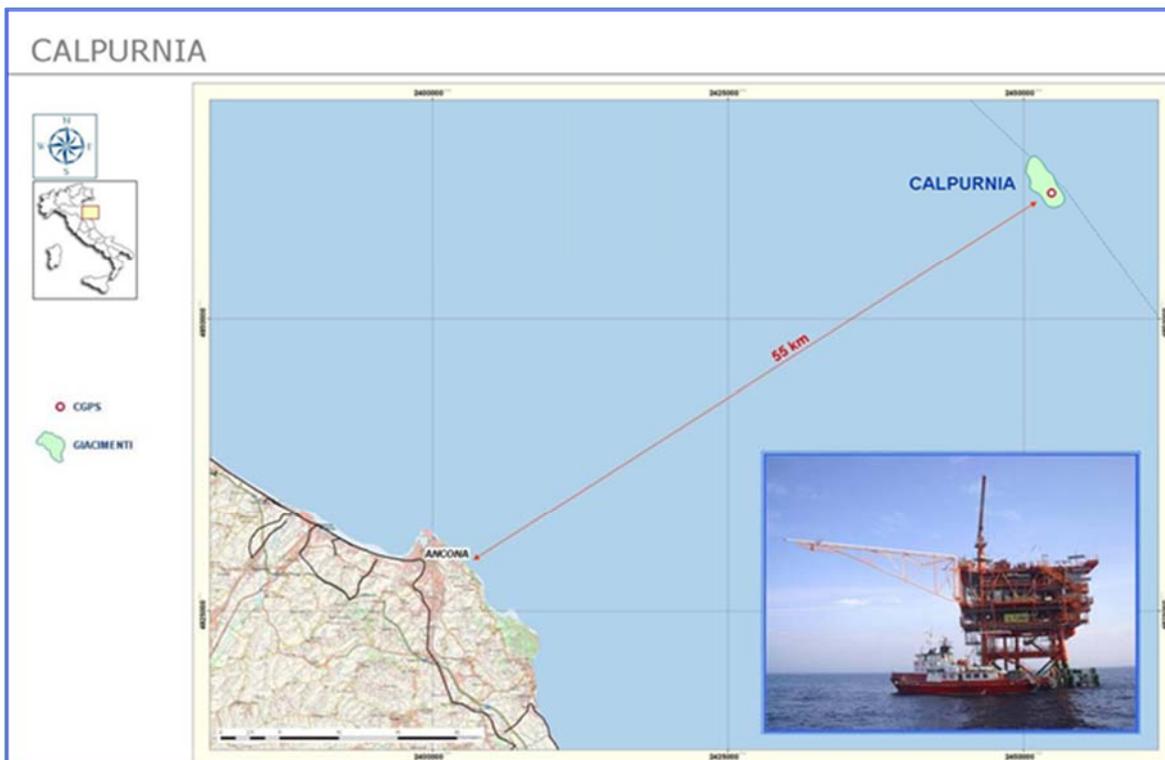


Figura 1 - Ubicazione del campo di Calpurnia

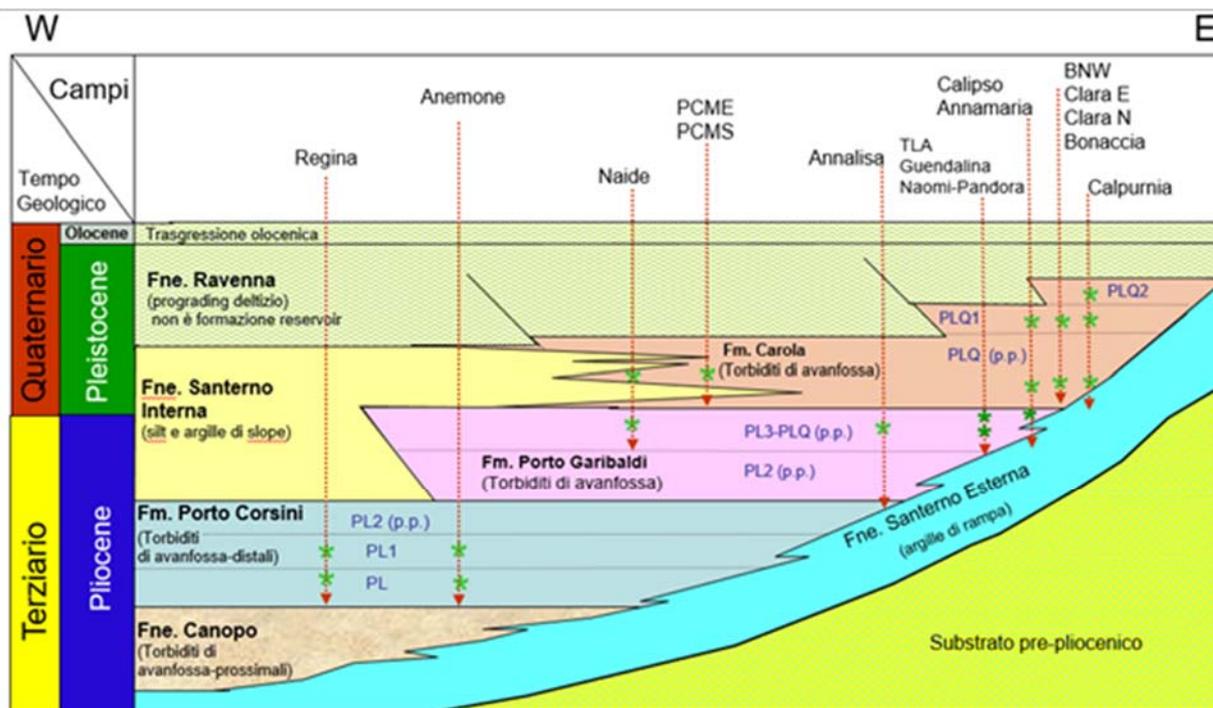


Figura 2 - Bacino Adriatico settentrionale: esempio di schema dei rapporti stratigrafici e dei principali reservoir (*) sviluppati dai campi

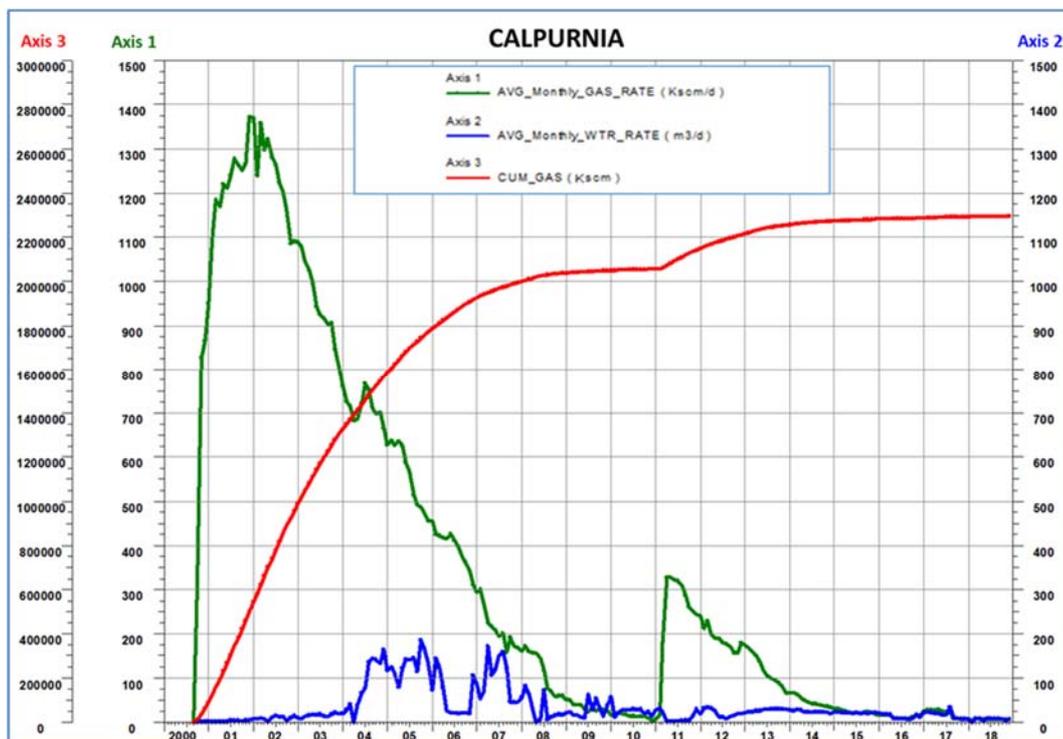


Figura 3 - Campo di Calpurnia: produzione storica

| CAMPO DI CALPURNIA | | | | | |
|--------------------|--|--------------------|---|--------------------|---|
| ANNO | Produzione annuale (MSm ³) | | Produzione cumulativa (MSm ³) | | Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE |
| | Reale | Modello 3D ECLIPSE | Reale | Modello 3D ECLIPSE | |
| 2000 | 61 | 61 | 61 | 61 | 3% |
| 2001 | 441 | 441 | 502 | 502 | 22% |
| 2002 | 454 | 453 | 956 | 956 | 41% |
| 2003 | 349 | 349 | 1305 | 1305 | 56% |
| 2004 | 262 | 262 | 1567 | 1567 | 68% |
| 2005 | 205 | 205 | 1771 | 1771 | 76% |
| 2006 | 145 | 145 | 1916 | 1916 | 83% |
| 2007 | 79 | 79 | 1995 | 1995 | 86% |
| 2008 | 43 | 43 | 2038 | 2038 | 88% |
| 2009 | 13 | 13 | 2050 | 2050 | 89% |
| 2010 | 5 | 5 | 2056 | 2056 | 89% |
| 2011 | 87 | 87 | 2143 | 2143 | 93% |
| 2012 | 70 | 70 | 2212 | 2212 | 96% |
| 2013 | 44 | 44 | 2256 | 2256 | 97% |
| 2014 | 18 | 18 | 2274 | 2274 | 98% |
| 2015 | 8 | 9 | 2282 | 2282 | 99% |
| 2016 | 5 | 5 | 2287 | 2287 | 99% |
| 2017 | 7 | 8 | 2294 | 2295 | 99% |
| 2018 | 2 | 7 | 2296 | 2302 | 99% |
| 2019 | | 4 | | 2306 | |
| 2020 | | 4 | | 2310 | |
| 2021 | | 4 | | 2314 | |
| 2022 | | 2 | | 2316 | |

Figura 4 - Campo di Calpurnia: produzioni reali e da modello Eclipse 2017

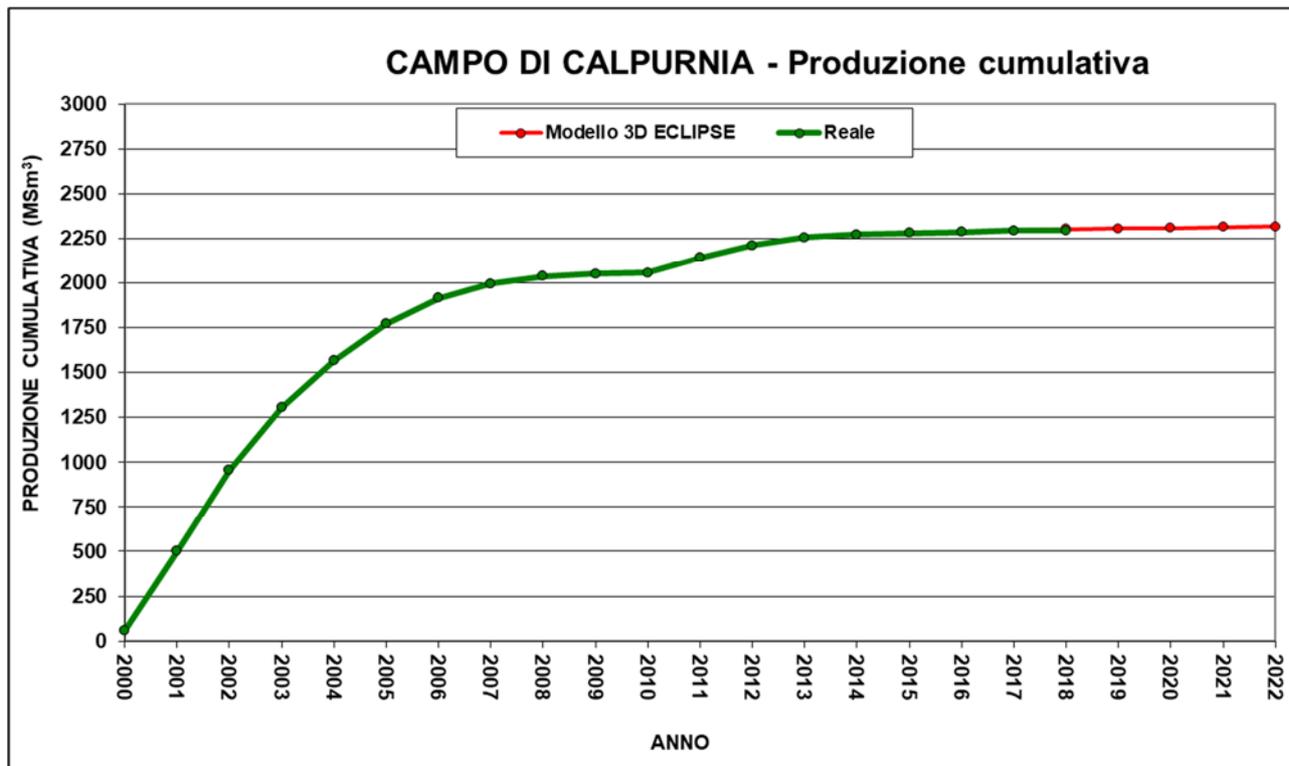


Figura 5 - Campo di Calpurnia: produzione reale e da modello Eclipse 2017

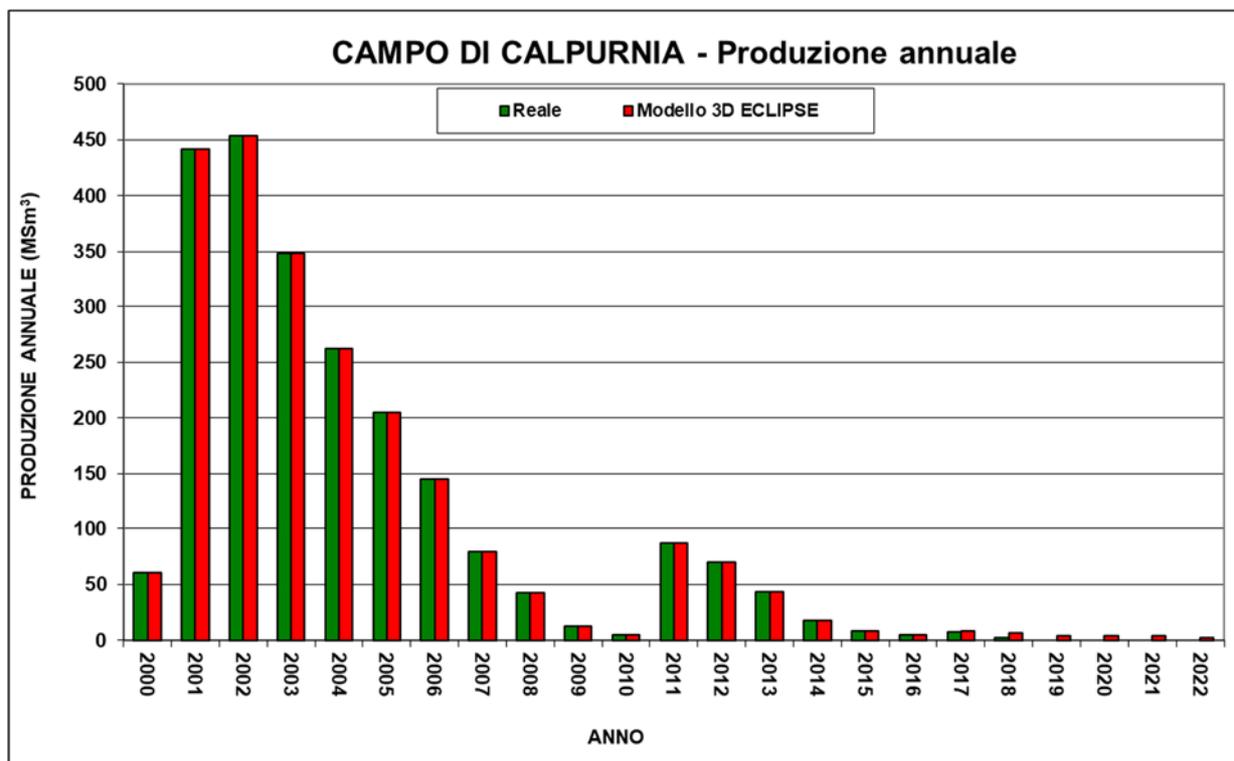


Figura 6 - Campo di Calpurnia: produzione (annuale) reale e da modello Eclipse 2017



| CAMPO DI CALPURNIA | | | |
|--------------------|------------------|--------------|-------------------|
| Data | Livello PLQ1-C | | |
| | Pressione (bara) | RFT in pozzo | Profilo in string |
| 01/04/2000 | 86 | | 6 C |
| 01/10/2001 | 80 | | 6 C |
| 12/11/2002 | 72 | | 6 C |
| 29/02/2004 | 67 | | 6 C |
| 01/06/2009 | 82 | | 6 C |
| 11/01/2011 | 89 | 4 dir A | |
| 09/12/2013 | 84 | | 6 C |
| 11/12/2014 | 83 | | 6 C |
| 01/09/2015 | * | | 6 C |
| 03/10/2016 | 83 | | 7 C |
| 01/12/2017 | 83 | | 7 C |
| 14/06/2018 | 84 | | 7 C |

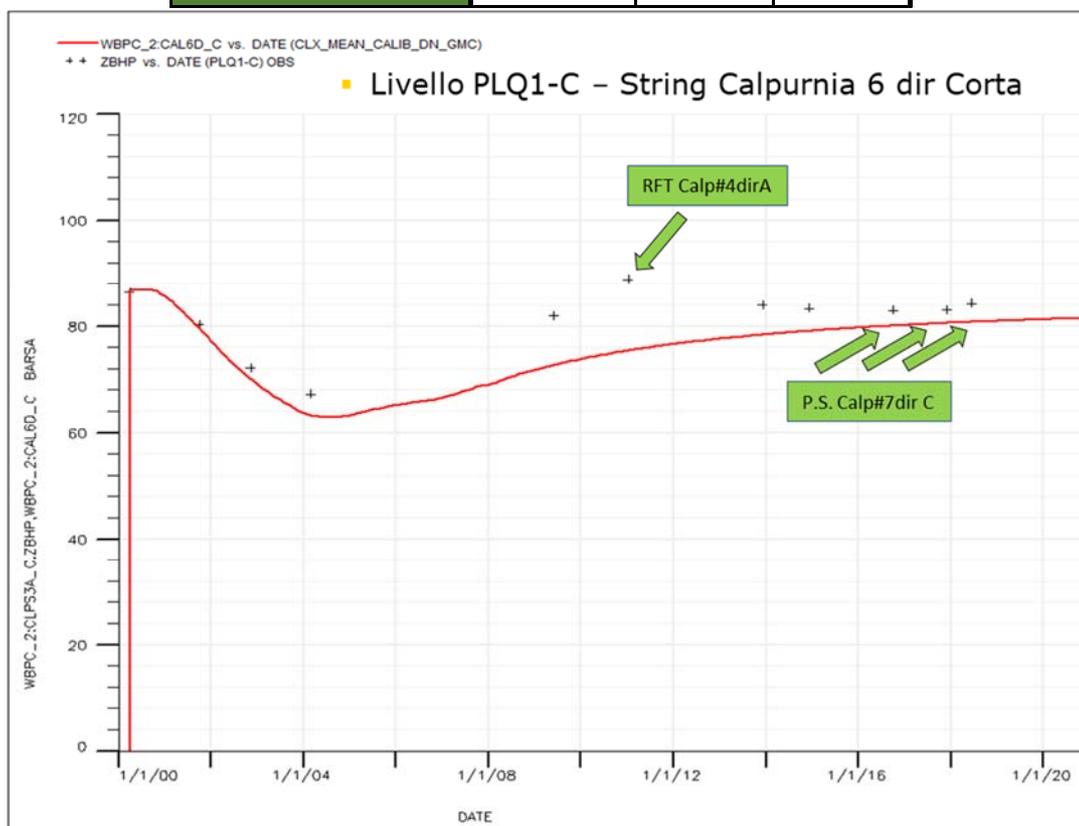


Figura 7 - Campo di Calpurnia: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse (livello PLQ1-C)

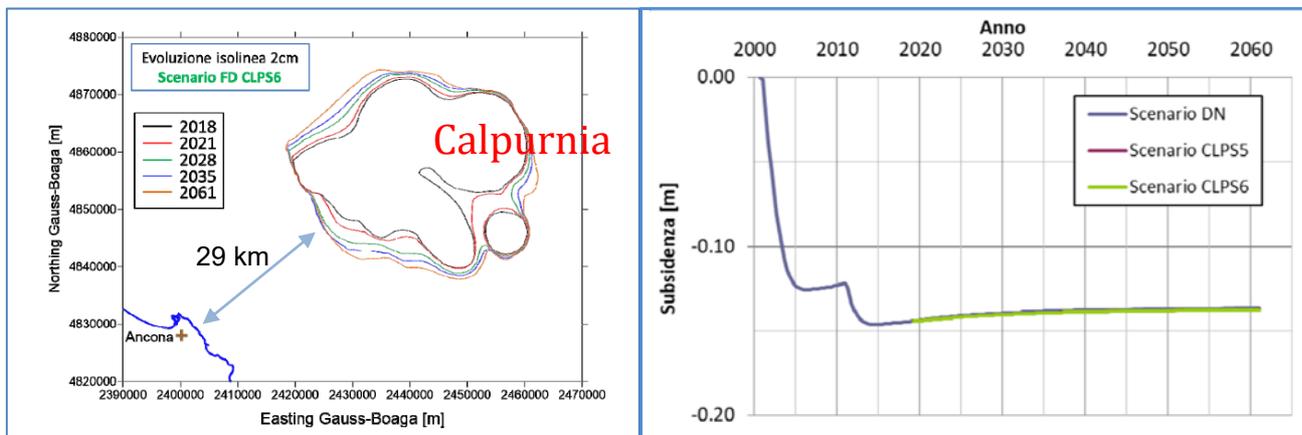


Figura 8 - Evoluzione nel tempo, rispettivamente della linea di iso-subsidenza dei 2cm e della subsidenza prevista nel punto di massimo, per i 3 scenari considerati

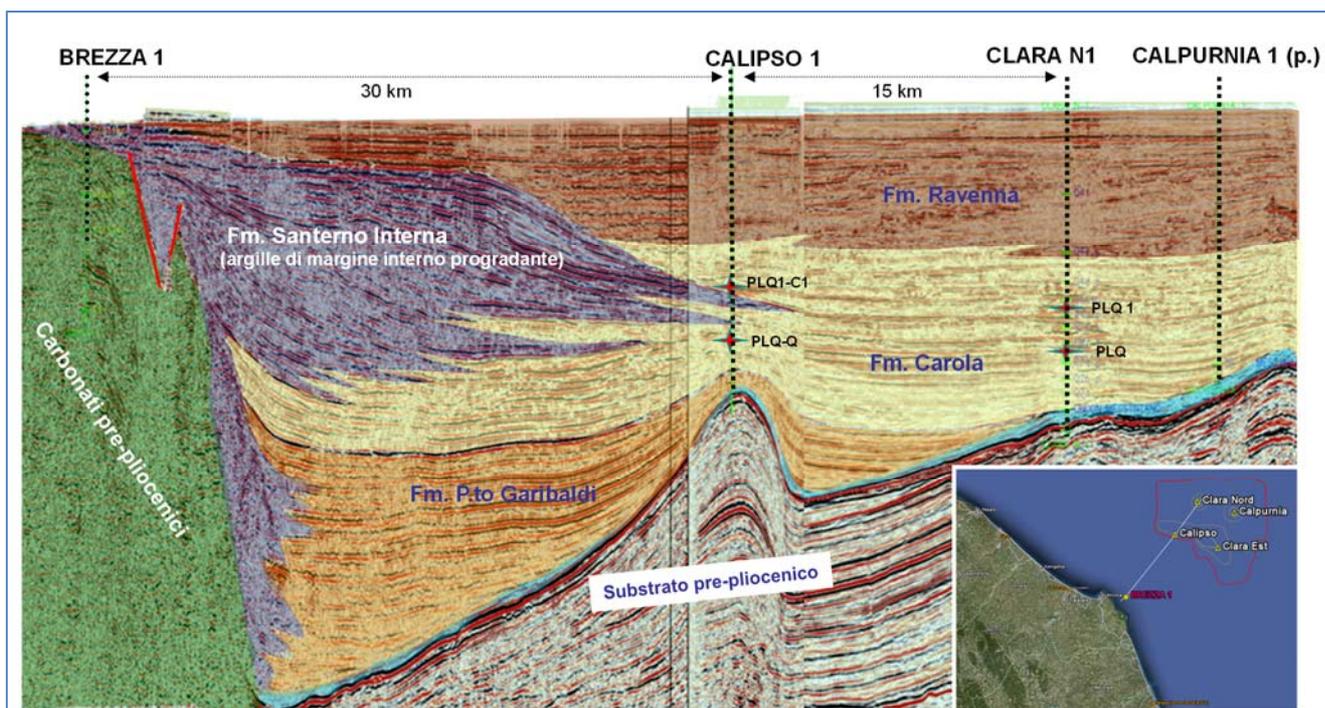


Figura 9 - Clara Complex e Calipso: sezione sismica interpretata

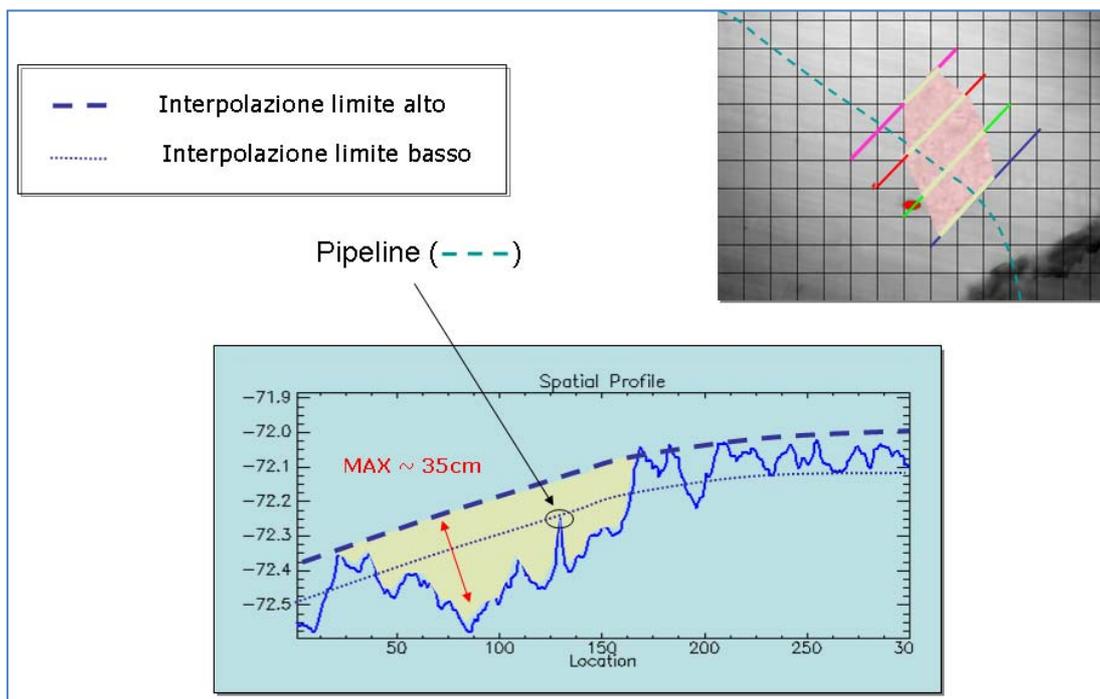


Figura 10 - Campo di Calpurnia: profilo batimetrico interpolato e differenza con la batimetria misurata

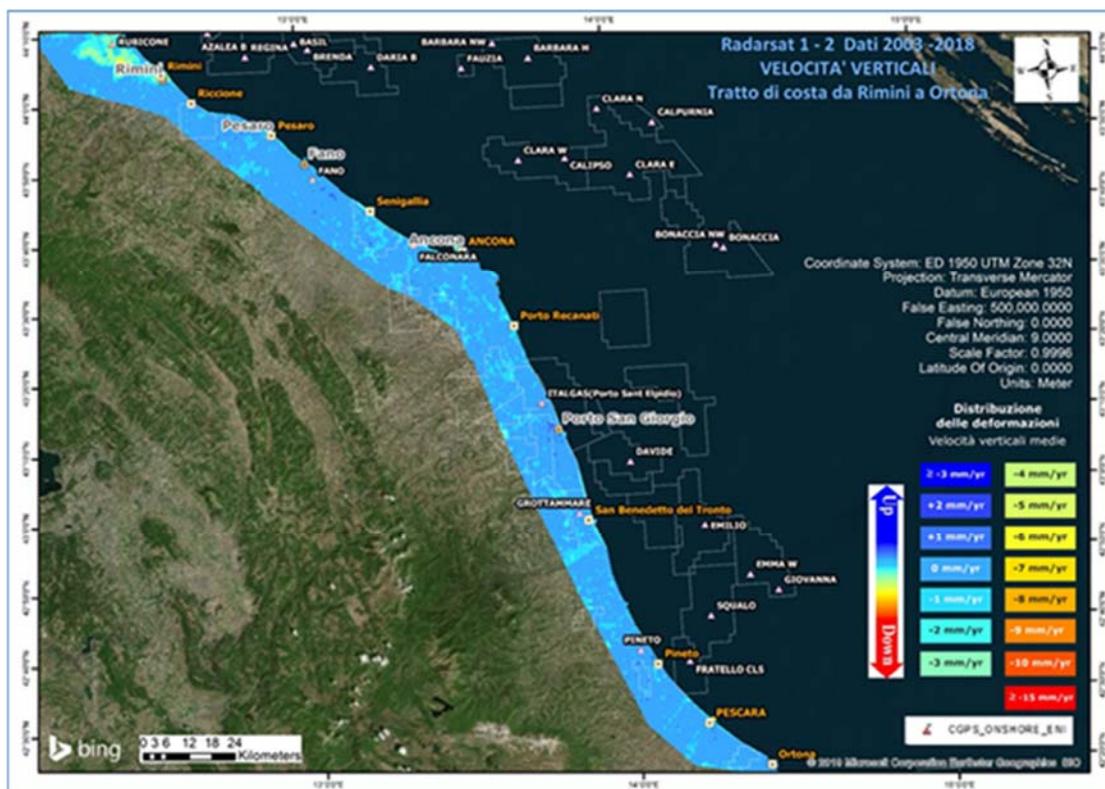


Figura 11 - Campo di Calpurnia: analisi dati SAR dal 2003 al 2018

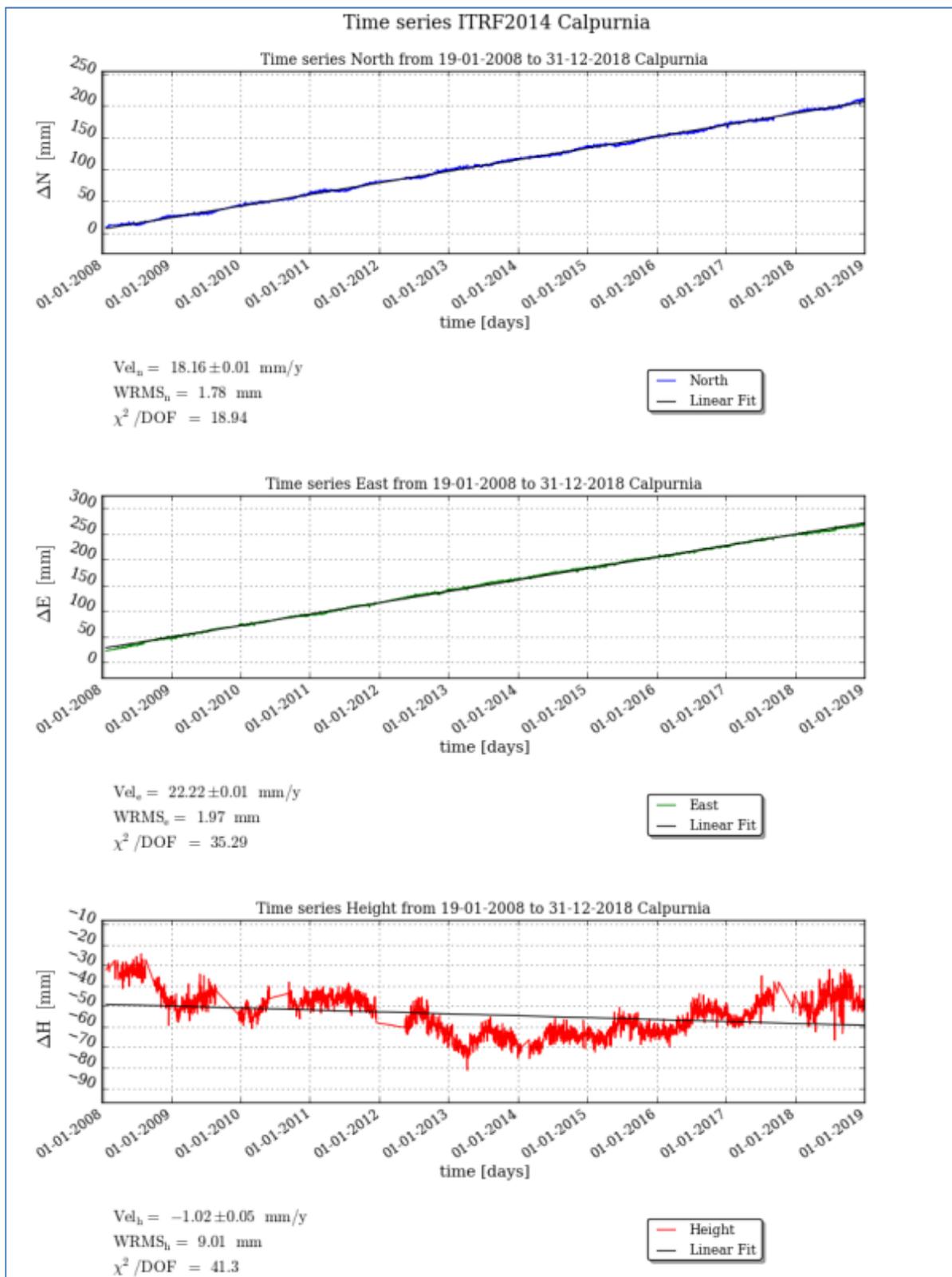
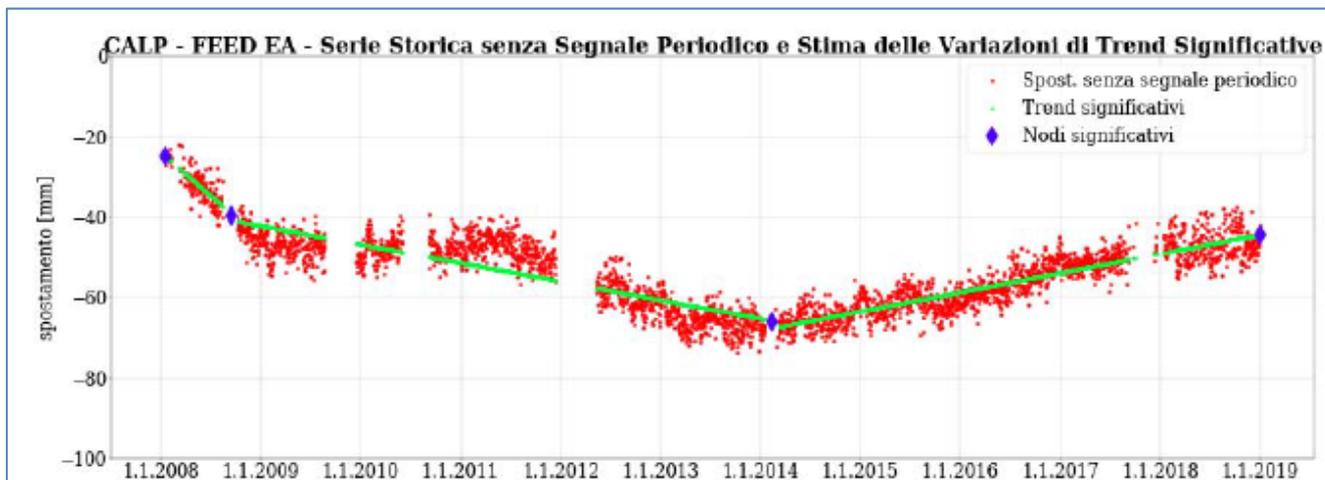


Figura 12 - Campo di Calpurnia: serie storica di misure CGPS



| FEED PP - MODELLO EMPIRICO | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|--|
| Periodo | velocità [mm/y] | sigma [mm/y] | |
| 09/12/2007 - 15/09/2008 | -24.18 | 1.13 | |
| 15/09/2008 - 31/01/2014 | -4.91 | 0.05 | |
| 31/01/2014 - 31/12/2018 | 4.43 | 0.06 | |

Figura 13 - Campo di Calpurnia: analisi della serie di misure CGPS

| CAMPO | Inizio produzione | Fine produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse) | Riserve prodotte @ dic.2018 | Max subsidenza prevista (Scenario di riferimento) | Ultimo aggiornamento studio | CGPS | | |
|------------------------|-------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | | | | | | inizio registrazione | vel.media (mm/a) @ dic.2018 | mesi di registrazione |
| ANEMONE | 1978 | 2018 | 100% | 36 cm al 2018 | 2015 | giu-07 | -4.8 | 122 |
| ANNALISA | 2000 | 2021 | 98% | 9 cm al 2027 | 2018 | ott-07 | -3.8 | 105 |
| ANNAMARIA B | 2009 | 2030 | 76% | 163 cm al 2031 | 2017 | gen-10 | -107.0 | 105 |
| BARBARA NW | 1999 | 2035 | 77% | 44 cm al 2029 | 2017 | gen-08 | -27.9 | 118 |
| BONACCIA | 1999 | 2026 | 93% | 233 cm al 2073 | 2018 | dic-07 | -71.2 | 131 |
| BONACCIA NW | 2015 | | | | | set-15 | -50.1 | 39 |
| CALIPSO | 2002 | 2025 | 87% | 84 cm al 2026 | 2017 | nov-07 | -14.1 | 128 |
| CALPURNIA | 2000 | 2022 | 99% | 14 cm al 2015 | 2017 | giu-07 | -1.0 | 122 |
| CLARA EST | 2000 | 2038 | 67% | 69 cm al 2061 | 2017 | nov-07 | -14.3 | 134 |
| CLARA NW | 2016 | | | 81 cm al 2038 | | mar-16 | -25.5 | 33.5 |
| CLARA NORD | 2000 | 2021 | 99% | 34 cm al 2016 | 2017 | nov-07 | -19.8 | 134 |
| ELETTRA | 2014 | 2029 | 64% | 11 cm al 2061 | 2017 | lug-14 | -21.0 | 53 |
| FAUZIA | 2014 | 2020 | 98% | 5 cm al 2068 | 2017 | set-14 | -5.0 | 51 |
| GUENDALINA | 2011 | 2022 | 84% | 8.5 cm al 2055 | 2018 | ago-11 | -6.3 | 88 |
| NAIDE | 2005 | 2020 | 98% | 8 cm al 2020 | 2017 | giu-05 | -3.7 | 162 |
| NAOMI - PANDORA | 2001 | 2037 | 52% | 2.6 cm al 2049 | 2017 | giu-02 | -2.0 | 198 |
| PCME (PMS) | 2001 | 2014 | 100% | 6,8 cm al 2026 | 2016 | lug-05 | -4.1 | 161 |
| REGINA | 1997 | 2030 | 98% | 130 cm al 2061 | 2017 | giu-07 | -24.1 | 138 |
| TEA - LAVANDA - ARNICA | 2007 | 2018 | 104% | 5 cm al 2018 | 2015 | nov-07 | -4.2 | 134 |

Figura 14 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

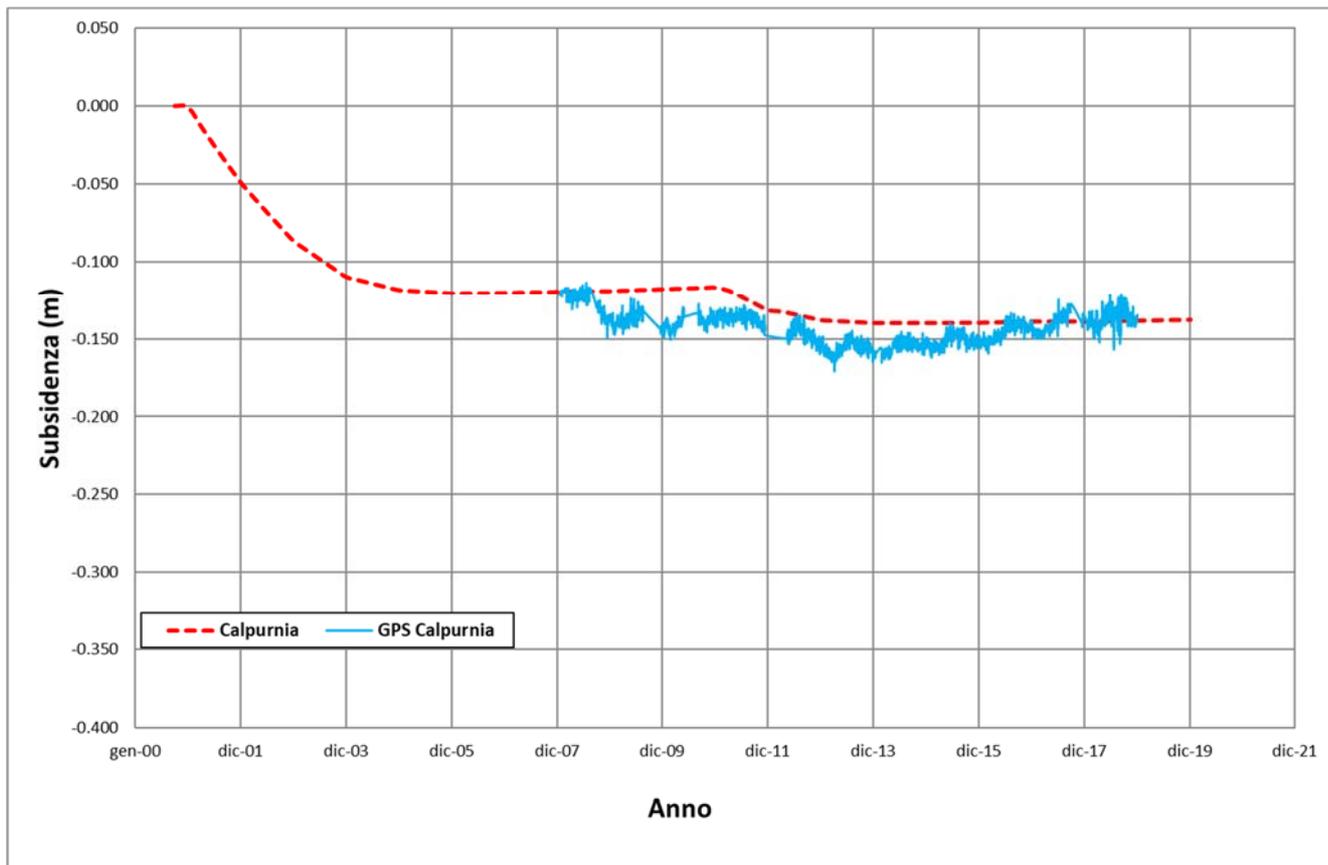


Figura 15 - Andamento della subsidenza misurata (CGPS in p.ma) comparata con la simulazione per il campo di Calpurnia

| campo CALPURNIA (Eni 100%) | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|
| DATI DI CAMPO | | DECRETO VIA n. 4170 del 15 novembre 1999 | |
| UBICAZIONE | offshore - 55 km a NE di Ancona | AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (CLARA COMPLEX) | |
| PROFONDITA' FONDALE | 72 m | SIA | |
| LITOLOGIA | sit. sabbie fini in livelli sottili | ULTIMO AGGIORNAMENTO | |
| FORMAZIONE RESERVOIR | Ravenna - Carola | STUDIO DI GIACIMENTO | MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "FEBBRAIO '96" |
| ZONA MINERARIA | PLQ2 - PLQ1 - PLQ | RISERVE (MSm ³) | 1536 (su un profilo di produzione di 9 anni) |
| PROFONDITA' RESERVOIR | 570 - 1015 (IVDSS) | MOD. GEOMECCANICO | GEERTSMA CILINDRICO |
| TIPO DI PIATTAFORMA | fissa - standard | MAX SUBS AL CENTRO (cm) | 8 (dopo 9 anni) |
| CARATTERISTICHE GEOLOGICHE | torbiditi sottili | DISTANZA DALLA COSTA (km) | # |
| | D.M @nov '99 @ 31 dic 2018 | STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI | |
| CONCESSIONE | B.C22.AG | LIVELLAZIONI | ACQUISITI DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA - PESARO-PORTO S. GIORGIO) ANTISTANTE IL CAMPO NEL PERIODO 1998-2009, 2011, 2014 e 2017. I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM. IL PROSSIMO RILIEVO DI ENTRAMBE LE RETI DI LIVELLAZIONE (DORSALE ADRIATICA E PESARO-PORTO S. GIORGIO) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO |
| DATA SCADENZA CONCESSIONE | 01/10/2014 | MARKERS | NON PRESCRITTI |
| N. POZZI | 5 | CGPS | NEL CORSO DEL 2007 E' STATO INSTALLATO UN CGPS IN PIATTAFORMA. NEL 2008 E' STATO INSTALLATO CGPS NELLA CENTRALE ENI DI FALCONARA (ONSHORE) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA |
| RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³) | 1981 | SAR | ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ OTT 2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.MA CALPURNIA. NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO |
| START UP PRODUZIONE | ott-00 | BATIMETRIE | ESEGUITO RILIEVO BATIMETRICO. DATA RILIEVO SETT 2007-FEBBRAIO 2008 |
| FINE PRODUZIONE PREVISTA | 2015 | | |
| GAS PRODOTTO (MSm ³) | 2296 | | |
| % RISERVE PRODOTTE | 99% | | |

Figura 16 - Campo di Calpurnia: scheda di sintesi dati campo

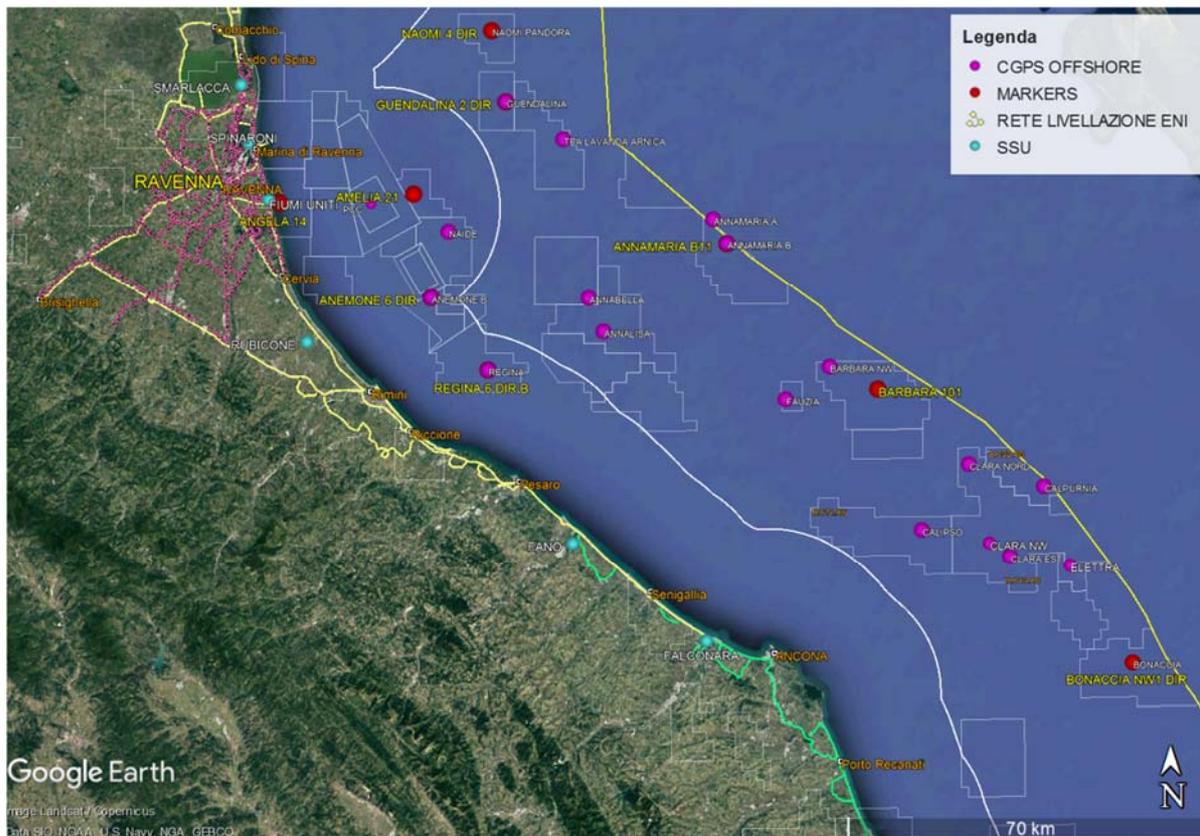


Figura 17 - Particolare della rete di monitoraggio Eni



Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2018

Le elaborazioni dei dati InSAR per il periodo 2003 - 2018 sono state effettuate con lo stesso algoritmo rispetto all'elaborazione dell'anno precedente.

In seguito verrà descritto con maggior dettaglio l'algoritmo utilizzato (vedi nota a fondo paragrafo "Tecnica PSP-DIFSAR"), cercando di mettere in luce le differenze dei principali algoritmi utilizzati in interferometria radar.

Analisi dati InSAR 2003 – 2018

L'analisi dei dati SAR ha interessato una serie di data-set, elaborati in fase di processamento in modo tale da garantire continuità spaziale dei dati.

Da un'analisi delle differenze tra le velocità medie annuali misurate dai CGPS presenti nell'area di interesse e quelle dei PS (Permanent Scatterer) presenti in un intorno di circa 300 m centrato nel corrispondente CGPS (Tab. 1), si è scelto di accorpare i data-set in due macro-aree, in modo tale che la taratura del dato InSAR minimizzi le differenze tra quest'ultimo e le misure CGPS.

In Tab. 1 vengono presentate: le velocità verticali dei CGPS, V_{vert_CGPS} , e il corrispondente scarto quadratico medio sqm_CGPS (colonna 3 e 4); la media delle velocità verticali dei Permanent Scatterer nell'intorno avente come centro il CGPS corrispondente $Media_V_SAR$, e il corrispondente scarto quadratico medio sqm_SAR (colonna 5 e 6); la differenza tra le velocità CGPS e SAR e il relativo scarto quadratico medio (colonne 7 e 8). Tutte le misure sono in millimetri/anno.

| | CGPS | V_{vert_CGPS} [mm/yr] | sqm_CGPS [mm/yr] | $Media_V_SAR$ [mm/yr] | sqm_SAR [mm/yr] | $Diff_VEL$ $CGPS-SAR$ [mm/yr] | sqm_diff [mm/yr] |
|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| RAVENNA | MANARA | -3.00 | 0.01 | -0.43 | 0.60 | -2.57 | 0.61 |
| | SMARLACCA | -6.33 | 0.01 | -3.41 | 1.09 | -2.92 | 1.10 |
| | SPINARONI | -7.50 | 0.01 | -4.34 | 0.97 | -3.16 | 0.98 |
| | FIUMI UNITI | -14.13 | 0.02 | -11.51 | 2.47 | -2.62 | 2.49 |
| FANO- ANCONA | RUBICONE | -2.54 | 0.04 | -3.13 | 2.01 | 0.59 | 2.05 |
| | FANO | 0.13 | 0.02 | 0.17 | 0.69 | -0.04 | 0.71 |
| | FALCONARA | -0.28 | 0.03 | -0.23 | 1.43 | -0.05 | 1.46 |
| | ITALGAS | -0.06 | 0.03 | 0.41 | 1.35 | -0.47 | 1.38 |

Tab. 1. Taratura dato InSAR con misure CGPS

Come si può vedere in Tab. 1 le differenze di velocità tra dati CGPS e le velocità medie di dati InSAR rappresentati nella penultima colonna hanno andamenti diversi nell'intera area, con differenze che si aggirano intorno 3 mm/anno di media per i primi 4 CGPS, mentre per gli ultimi 4 CGPS si notano differenze massime intorno al mezzo millimetro. Di conseguenza si è scelto di mosaicare i diversi data-set in due macro-aree (Fig.1):

- Area di Ravenna
- Area di Fano-Ancona

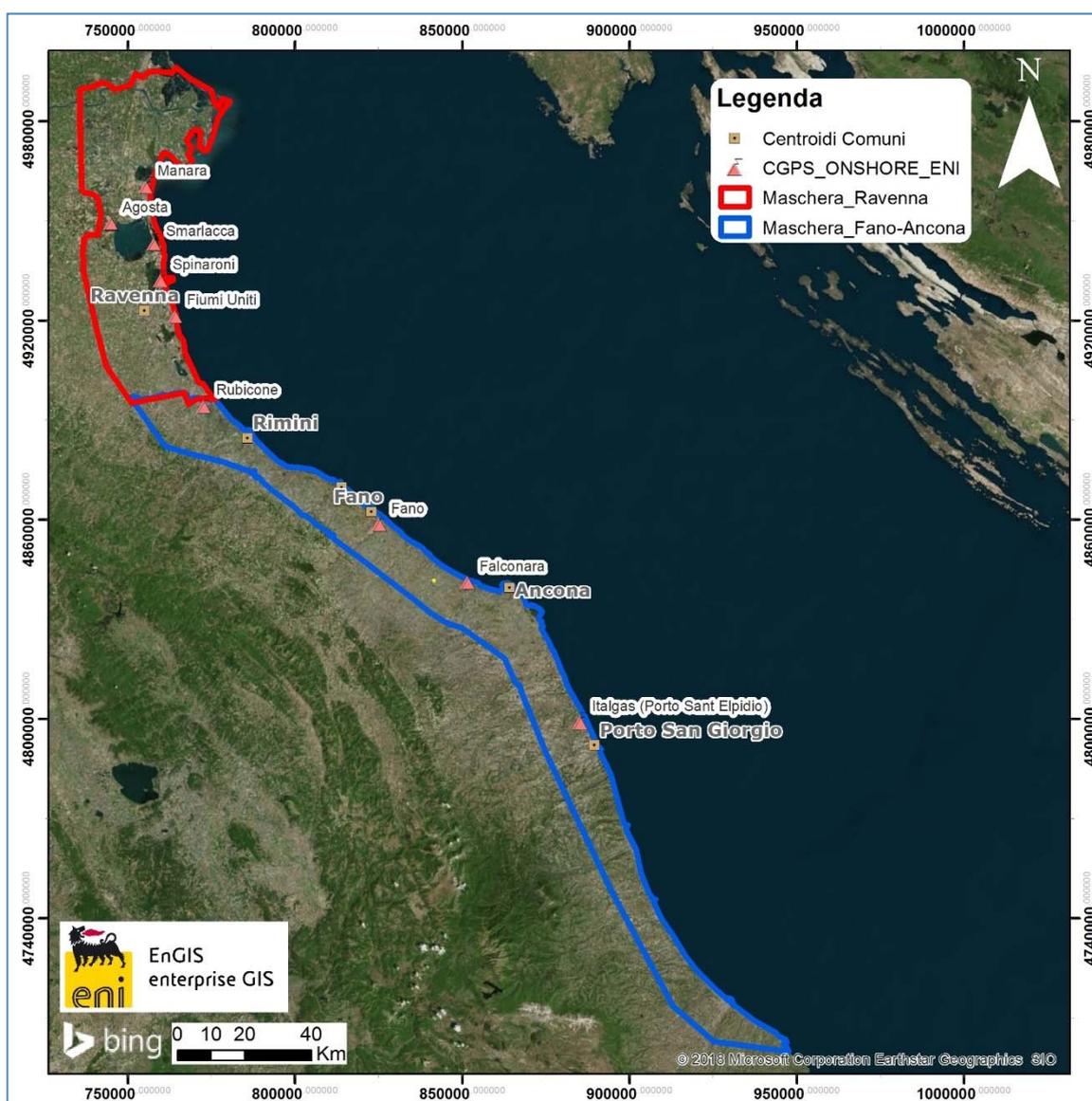


Fig. 1 – Mappa mosaicata dati InSAR



Complessivamente risultano presenti le seguenti stazioni CGPS afferenti alla rete eni:

1. Area Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti
2. Area Fano-Ancona: Rubicone, Fano, Falconara, Italgas

Il processo di calibrazione è stato realizzato utilizzando le informazioni derivanti dalle stazioni di monitoraggio CGPS esistenti all'interno delle aree analizzate, partendo dalle stazioni che presentano una serie storica più consistente (Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti). Si è realizzata quindi la calibrazione dei dati SAR partendo dall'area più a nord (area Ravennate), utilizzando i dati di velocità della stazione di Smarlacca; i dati delle stazioni di Fiumi Uniti e di Spinaroni e di tutte le altre stazioni, sono stati utilizzati esclusivamente come valore di verifica dei risultati ottenuti con la calibrazione.

La determinazione delle velocità verticali con dati CGPS è stata calcolata sulla serie storica totale del dato, che per quanto riguarda le postazioni di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti ha un inizio di acquisizione leggermente anteriore rispetto a quello dei dati SAR.

Queste velocità così calcolate hanno una differenza sotto il decimo di millimetro, rispetto a quelle calcolate sullo stesso periodo di acquisizione, da considerarsi pertanto trascurabile ai fini di questo studio. L'analisi dei dati SAR non calibrati, relativi all'area ravennate nell'intorno della stazione CGPS di Smarlacca per un raggio di 300 metri, ha evidenziato una velocità media pari a -3.41 ± 1.09 mm/anno. Considerando la velocità determinata con il CGPS di -6.33 ± 0.01 mm/anno, si rileva una differenza di -2.92 ± 1.10 mm/anno.

Per questo motivo ai valori di velocità media della componente verticale determinata con il monitoraggio SAR, è stato aggiunto il valore di -2.92 ± 1.10 mm/anno. Successivamente sono stati confrontati i punti SAR, che ricadevano in un intorno di raggio pari a 300 m, rispetto ai CGPS di Manara, Fiumi Uniti e Spinaroni. Il confronto mostra delle differenze, tra i singoli CGPS e i dati SAR calibrati, sotto il mezzo millimetro: ciò conferma la validità della calibrazione effettuata. In Fig. 2 si possono visualizzare i dati InSAR ottenuti a valle del processo di calibrazione, interpolati con un algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) con Tool ArcGis Spatial Analyst® per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

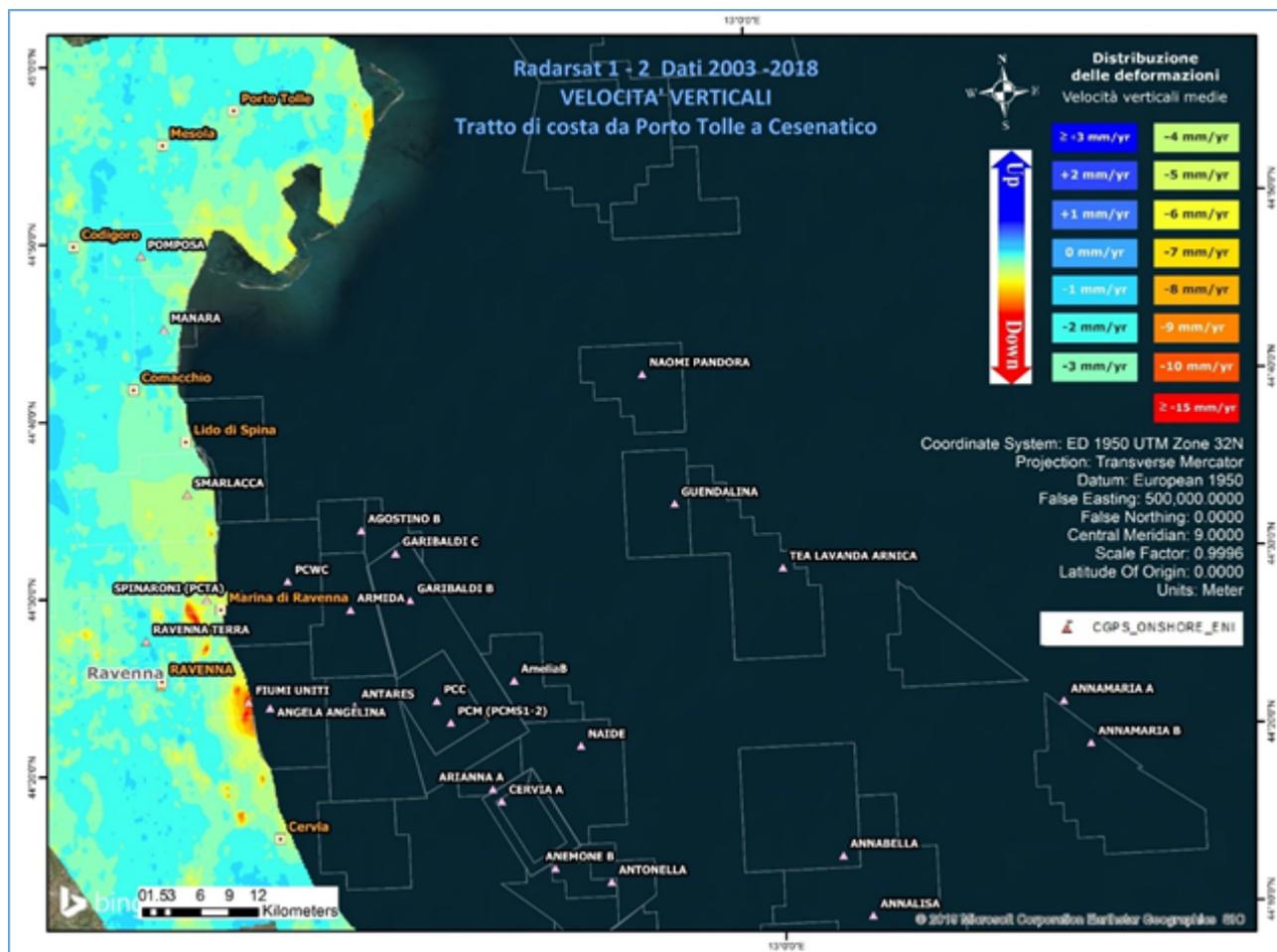


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

Come già effettuato nel 2018, l'altro data set (Area di Fano-Ancona, vedi Fig.1), verrà analizzato separatamente dall'area ravennate in quanto è stata rilevata una coerenza delle misure SAR con le misure delle stazioni CGPS interne a ciascun area.

Analizzando l'area SAR di Fano-Ancona, si evidenzia come le velocità dei CGPS di Rubicone, Fano, Falconara e Italgas siano allineate con le velocità misurate dal SAR, con uno scarto inferiore al millimetro (Tab. 1). Si fa presente che per il confronto viene considerato un intorno di circa 300 m, e la velocità dei dati SAR è una media delle velocità verticali dei Permanent Scatterer (PS) che ricadono all'interno di questo intorno. Considerata l'esiguità della differenza tra il valore misurato dal CGPS di FANO e quella del dato SAR (-0.04 ± 0.71 mm/anno), non si è ritenuto necessario eseguire una calibrazione. Come è possibile notare in Tab.1 per i vari CGPS presenti nell'area il confronto mostra delle



differenze rispetto ai dati SAR puri di circa mezzo millimetro in media. In Fig.3 è visualizzata l'interpolazione dei dati mosaicati, per l'area Fano-Ancona nel tratto di costa da Rimini ad Ortona. L'interpolatore utilizzato è l'algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) con Tool ArcGis Spatial Analyst®.

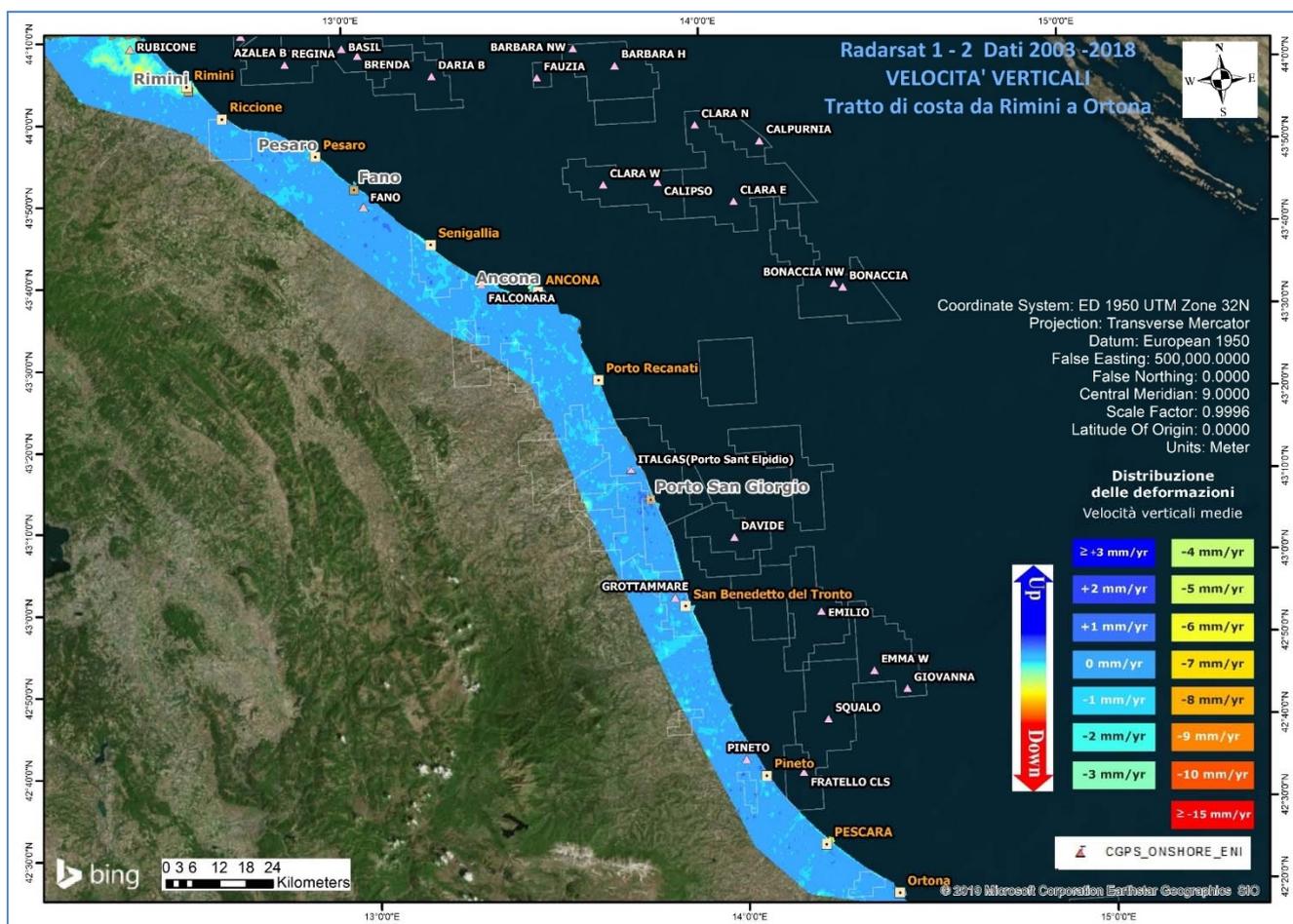


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

Confronto dati SAR 2003 – 2017 vs 2003 – 2018

Il processo di sottrazione tra IDW 2018 e IDW 2017 permette di evidenziare graficamente eventuali differenze nell'andamento medio delle velocità verticali.

Come mostrato in Fig. 4 e Fig. 5 la sottrazione tra i due IDW non mostra differenze importanti, ed in ogni caso rientranti all'interno della deviazione standard dichiarata. Per quanto riguarda punti spot che mostrano differenze più marcate (come ad esempio un'area a ovest di Comacchio o una ad est di Porto Tolle), da un'attenta analisi del dato si è riscontrato come si tratti di aree in cui i dati SAR sono assenti o molto esigui, per cui l'interpolazione IDW ha generato un dato non attendibile per un anno o il successivo, da cui differenze non realistiche.

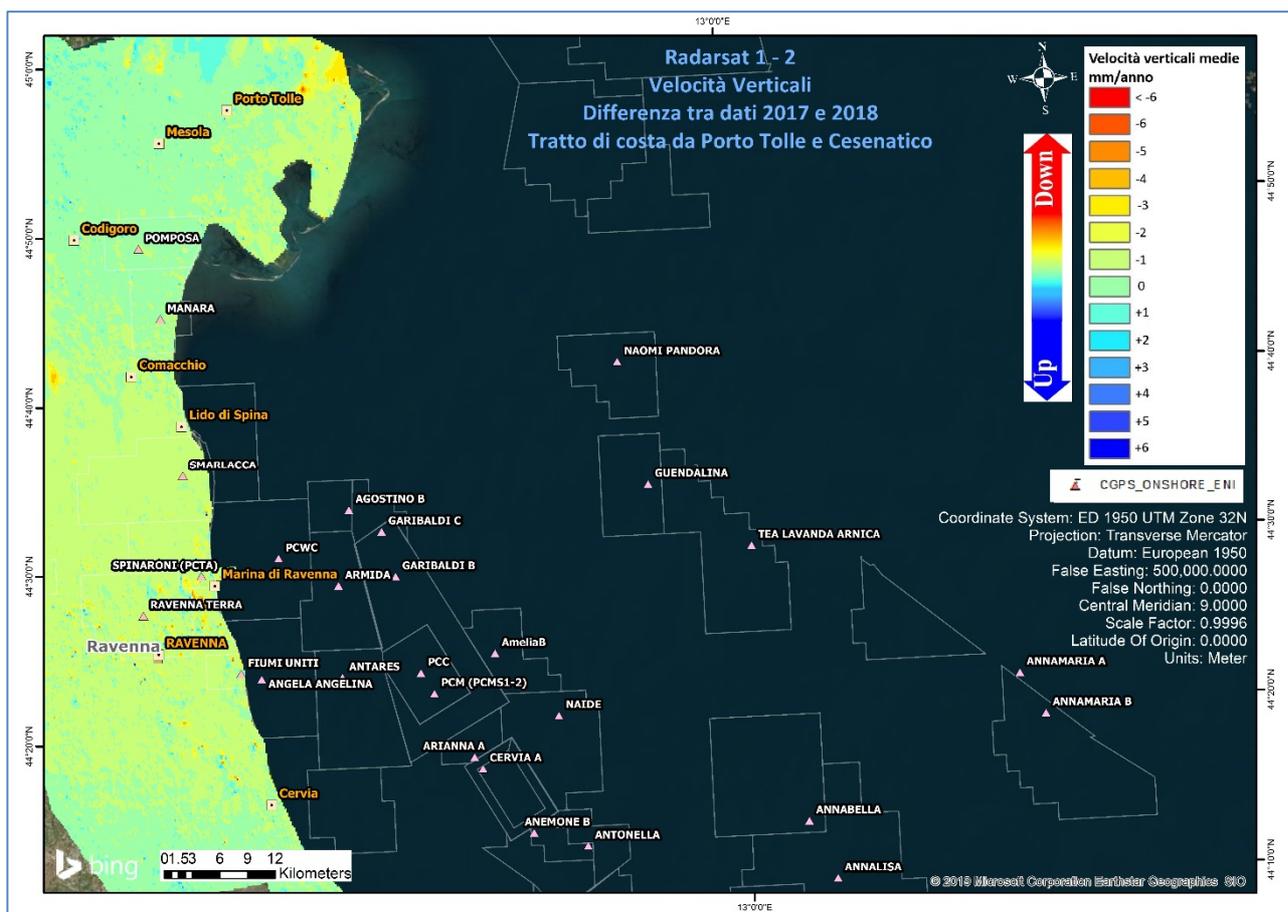


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

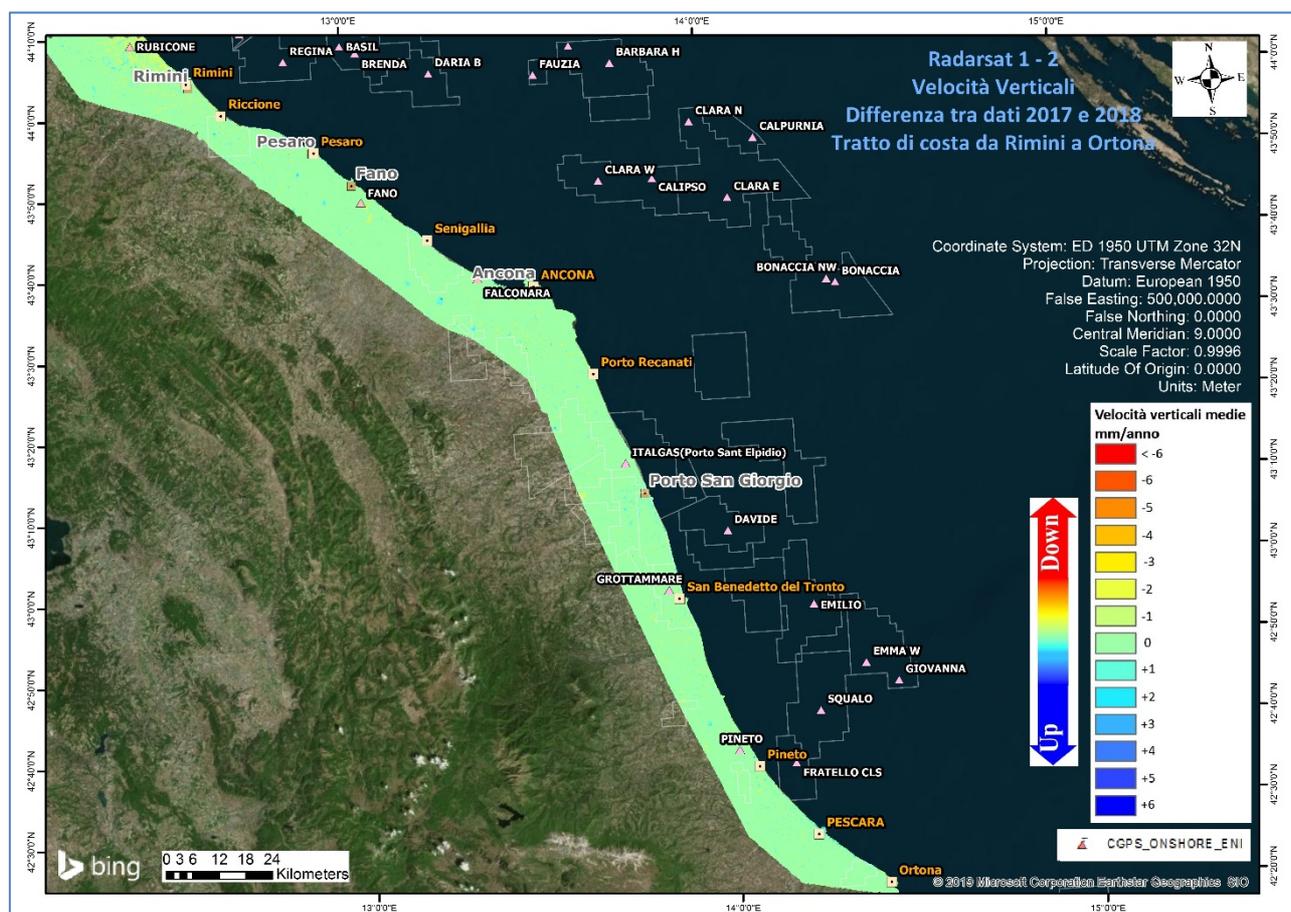


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

Tecnica PSP-DIFSAR (Estratto dalle Linee guida MATTM 2009)

La tecnologia interferometrica 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 Scatterer (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare movimenti lenti del terreno dovuti a frane, subsidenza, fenomeni vulcanici e sismici (Costantini et al., 2005). I PS corrispondono generalmente ad elementi al suolo, come manufatti (ad esempio, parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici in genere) oppure corpi naturali (ad esempio, rocce esposte) che si distinguono dagli altri, presenti nell'area esaminata, per il fatto di



possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar". Questi punti presentano caratteristiche tali da permettere misure estremamente accurate della distanza sensore-bersaglio così da poter evidenziare spostamenti relativi dei PS nel tempo anche solo di pochi millimetri. L'interferometria differenziale si basa su un sensore SAR a bordo di un satellite che invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e riceve 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 un'area soggetta a fenomeni di deformazione superficiale, il sensore, passando in istanti successivi sulla stessa area di interesse, rileva tra un'acquisizione e l'altra una variazione di distanza. Questo dato, 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.), rende possibili misure estremamente accurate di eventuali spostamenti superficiali lenti dell'area di interesse. Una delle peculiarità 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 Scatterer. Infatti, due punti vicini sono affetti allo stesso modo da artefatti atmosferici ed orbitali, ed in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo). Il metodo PSP presenta le seguenti differenze rispetto alle tecniche PSI standard: non richiede calibrazione dei dati o interpolazioni basate su modelli (in particolare per la rimozione degli artefatti atmosferici ed orbitali) è meno sensibile alla densità dei PS e permette una migliore identificazione dei PS in terreni naturali e dei PS caratterizzati da movimenti non lineari nel tempo; in aggiunta è computazionalmente efficiente ed altamente parallelizzabile. La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone vegetate o perennemente innevate. L'insieme dei PS sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (Global Positioning System) permanente. La loro densità su scala regionale è però ordini di grandezza superiore a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali, fornendo un quadro d'insieme a costi decisamente più bassi rispetto a queste, dato che il sensore rileva punti di misura che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione trovandosi già sul terreno.

Appendice B: Stazioni *EPSU* lungo la fascia costiera compresa tra Cervia e Ancona - aggiornamento a dicembre 2018

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.

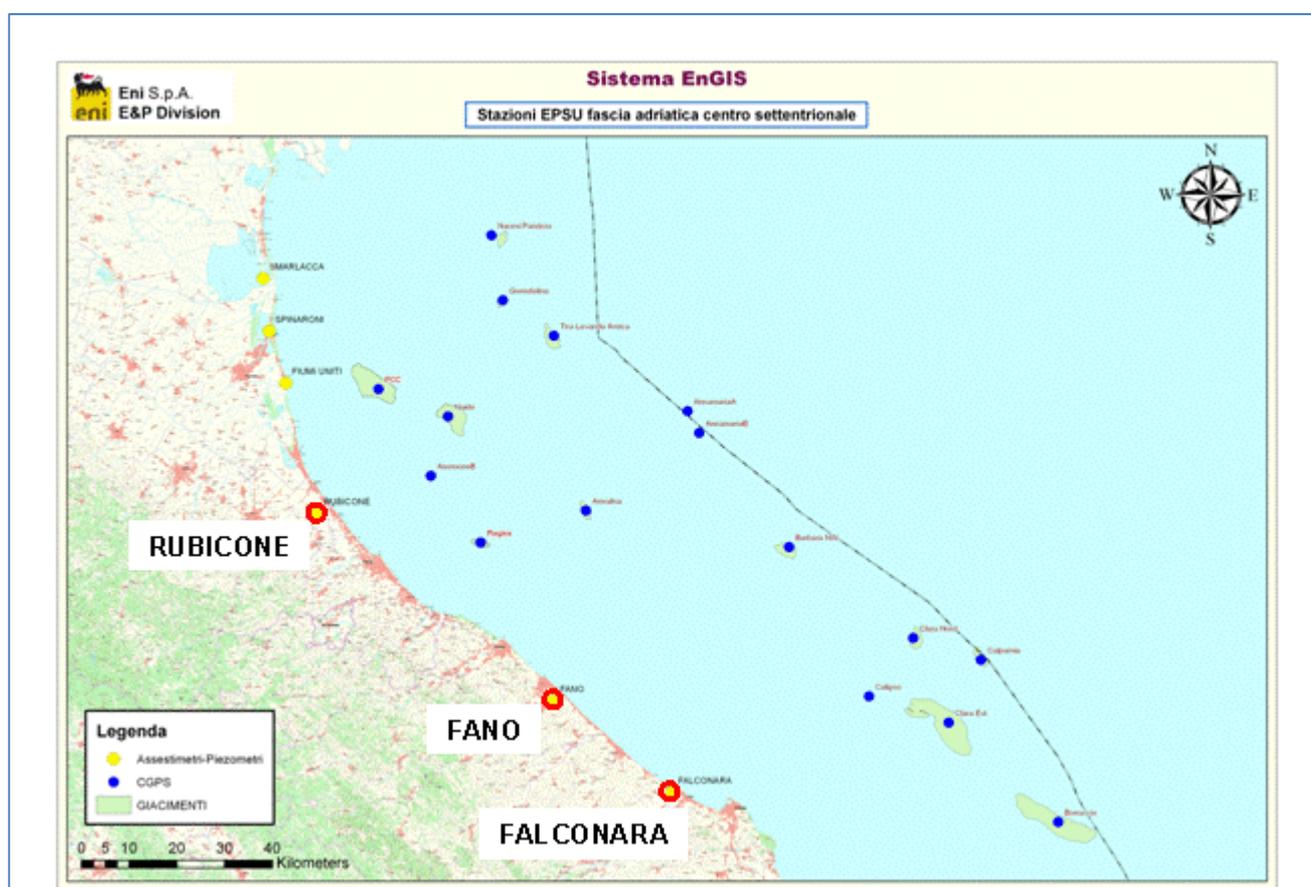


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

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.

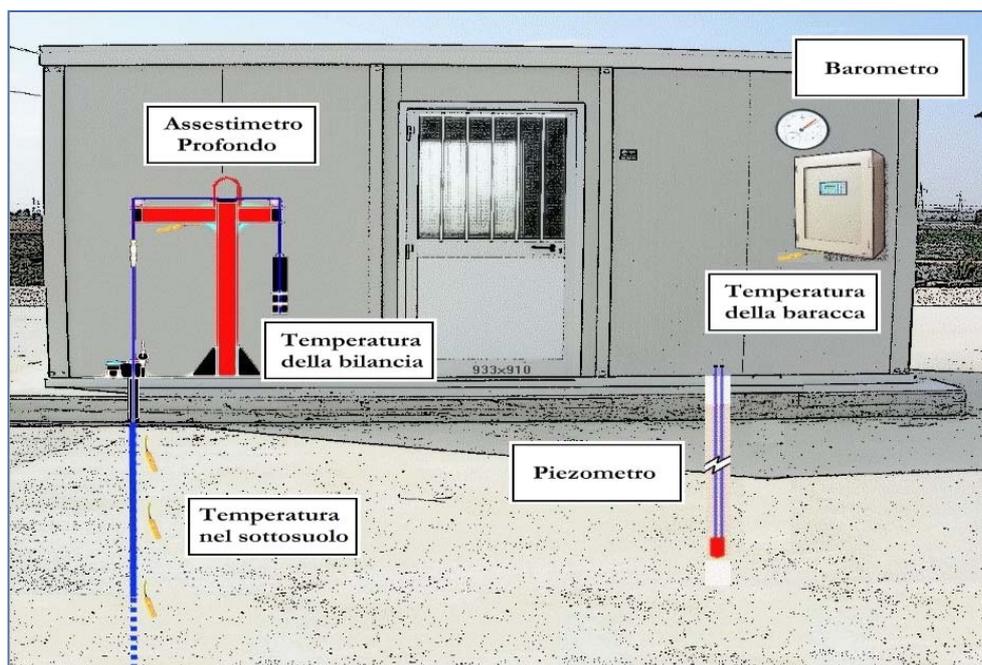


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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

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

Per ciascuna stazione *EPSU* vengono di seguito presentati:

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

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



Stazione *EPSU* di RUBICONE (installata dicembre 2009)

Strumentazione:

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

La strumentazione messa in opera nella stazione è illustrata schematicamente nella Figura 3B e Figura 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 è iniziata l'8 aprile 2009. A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" dei sensori di misura.

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

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

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

A dicembre 2017 è stata fatta manutenzione straordinaria dei tre piezometri con spurgo e lavaggio dei 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 era comunicazione idraulica fra gli stessi. Le celle e i tubi di tutti e tre i 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 affidabili per restituzione dei dati. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in giugno, luglio e ottobre 2018.



Analisi dei dati assestimetrici

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

Nei grafici allegati (Figura 6B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero").

Tale misura è quella dell'8 aprile 2009, data di collaudo del sistema. I valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione, quelli negativi, viceversa, un incremento dello spessore (cioè espansione) degli strati di terreno monitorati. Nel caso della stazione di Rubicone, l'andamento nel tempo della curva di compattazione/espansione registrata dall'assestimetro si correla molto bene con le variazioni di livello dell'acqua nelle tre falde monitorate dai piezometri rispettivamente a 70 m, 146 m e 178 m di profondità.

Per tutto il periodo osservato si nota, infatti, un ritardo medio di circa $1.5 \div 2$ mesi nella espansione/compattazione del terreno rispetto all'escursione massima (marzo/aprile) e minima (agosto/settembre) dei livelli di tali falde, Figura 7B confronto delle misure piezometrica profonda e assestimetrica dell'ultimo anno.

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 8B). 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 -2.54 mm/a, abbastanza prossima a quella ottenuta, in modo analogo, dalle misure assestimetriche, che è pari a -2.81 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 del livello delle falde acquifere e/o dal loro emungimento.



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

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

Analisi dei dati piezometrici

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

Nel caso di Rubicone si notano delle effervescenze gassose nei tubi piezometrici causate dalla presenza di piccole quantità di gas nell'acqua; il fenomeno del resto era già osservato durante le operazioni di messa in opera dell'attrezzatura. Queste piccole effervescenze causano differenze di misura dei livelli d'acqua nei due tubi del piezometro profondo (pozzo CGRP-1). Nel mese di ottobre 2012 si sono puliti e controllati i 3 piezometri verificando il loro buon funzionamento. Un nuovo spurgo è stato fatto a fine settembre 2014 e si può osservare dai grafici dei piezometri, soprattutto per la curva relativa a quello superficiale, che a partire da tale data si è modificata la dinamica dell'escursione del livello dell'acqua.

A dicembre 2017, come già detto, è stata fatta una manutenzione straordinaria con spurgo e lavaggio dei tre piezometri. Sono stati controllati anche tutti i trasduttori di pressione. L'affidabilità di questi ultimi, in particolare, è stata accertata facendo diverse misure manuali con 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.

Nel corso del 2018, controlli sulla strumentazione piezometrica sono stati effettuati nei mesi di giugno, luglio ed ottobre, nel controllo di giugno è stato sostituito un trasduttore di pressione del piezometro a 178m. Ad oggi (dicembre 2018) tutti i piezometri e relativi trasduttori, risultano integri ed in grado di fornire dati attendibili.

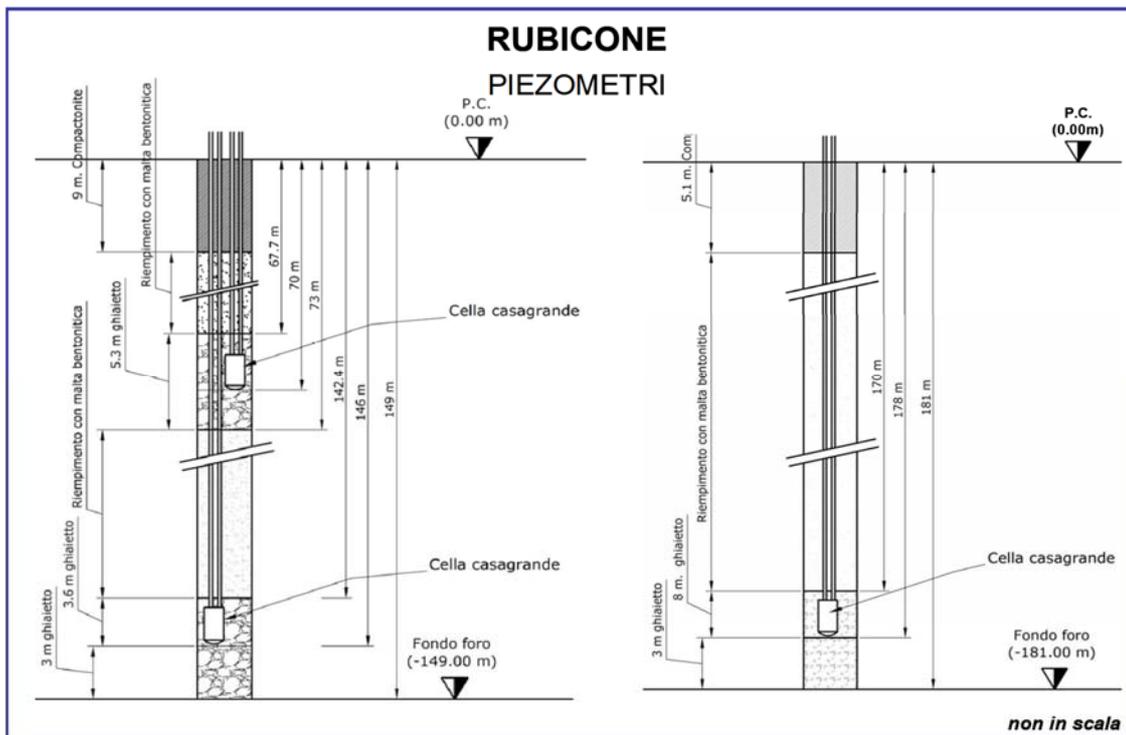


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

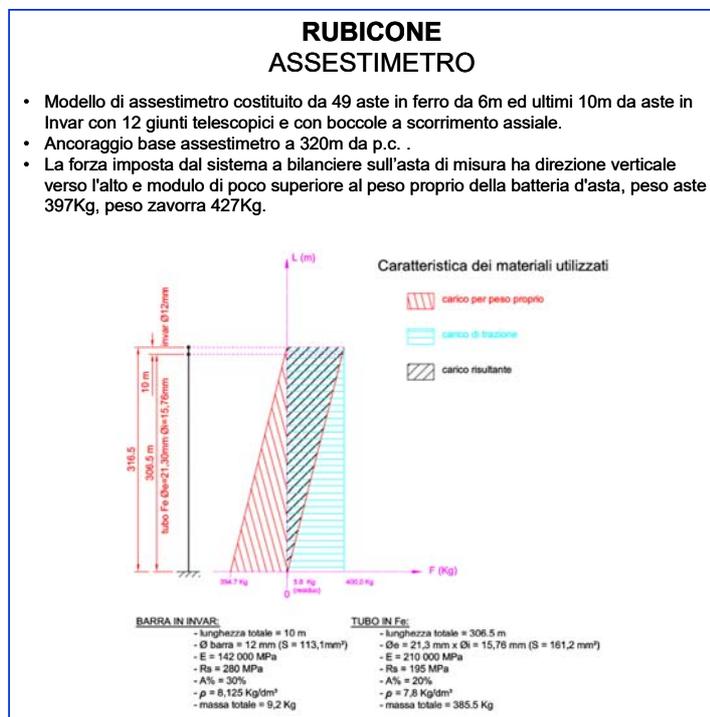


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

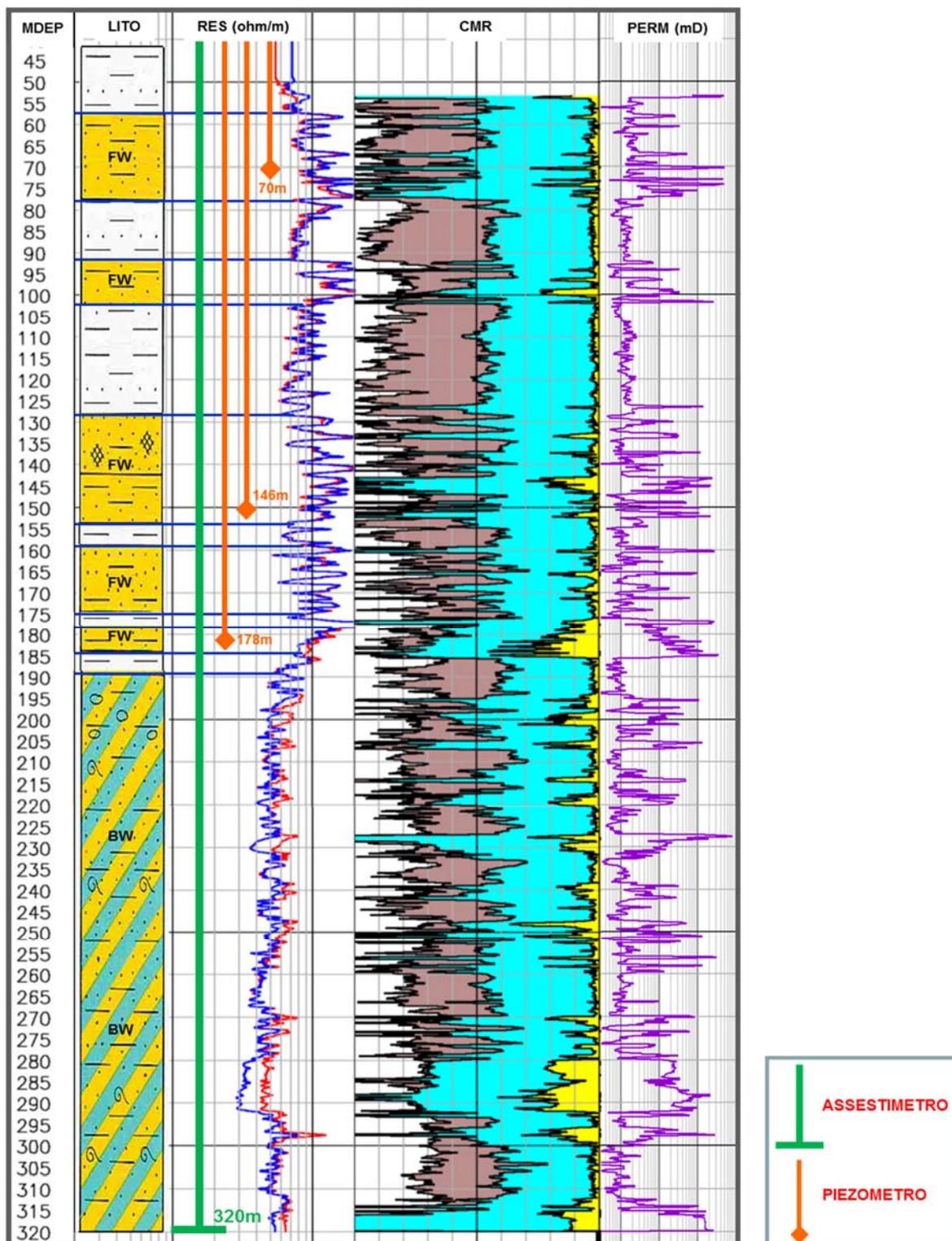


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

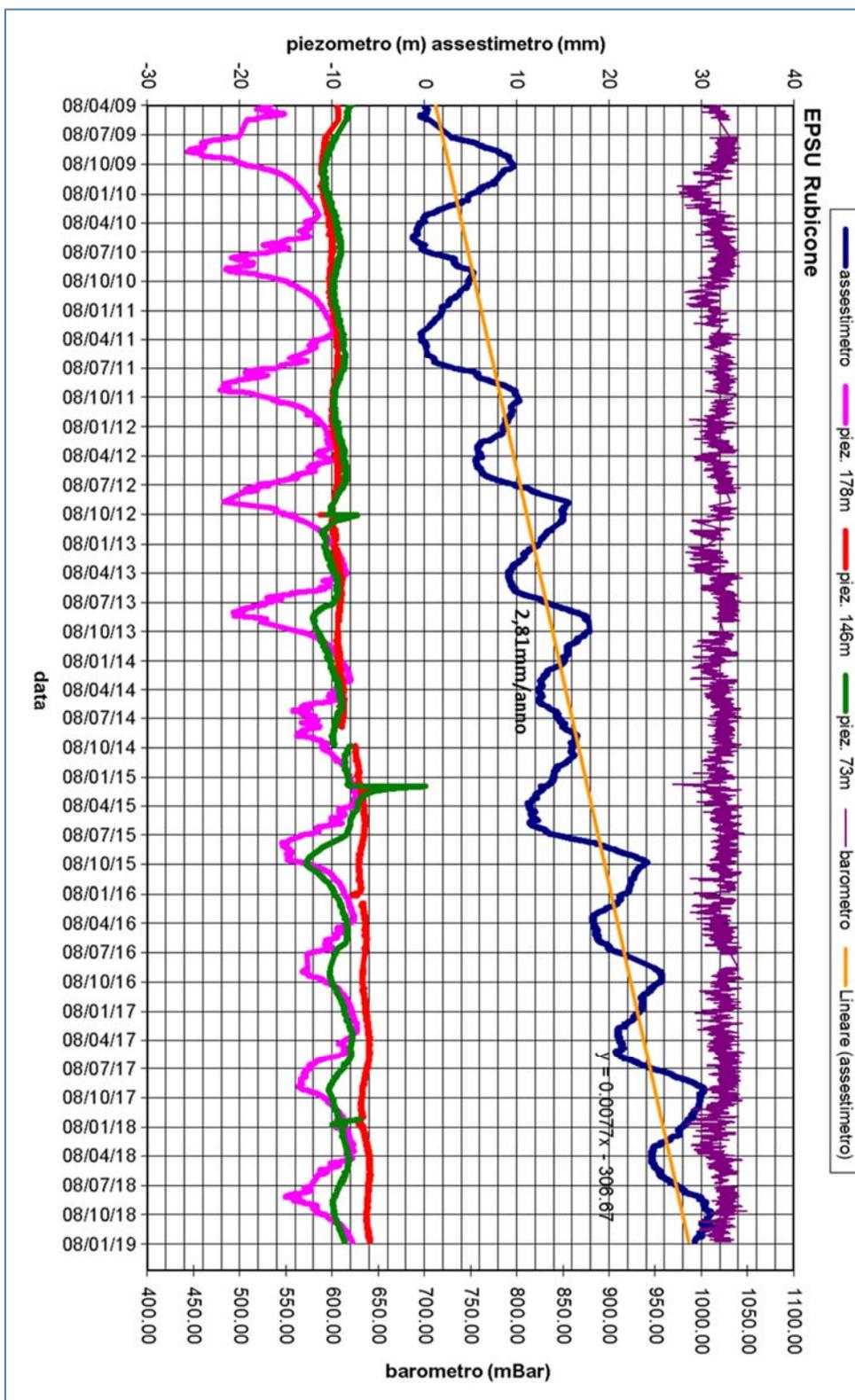


Figura 6B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestometriche

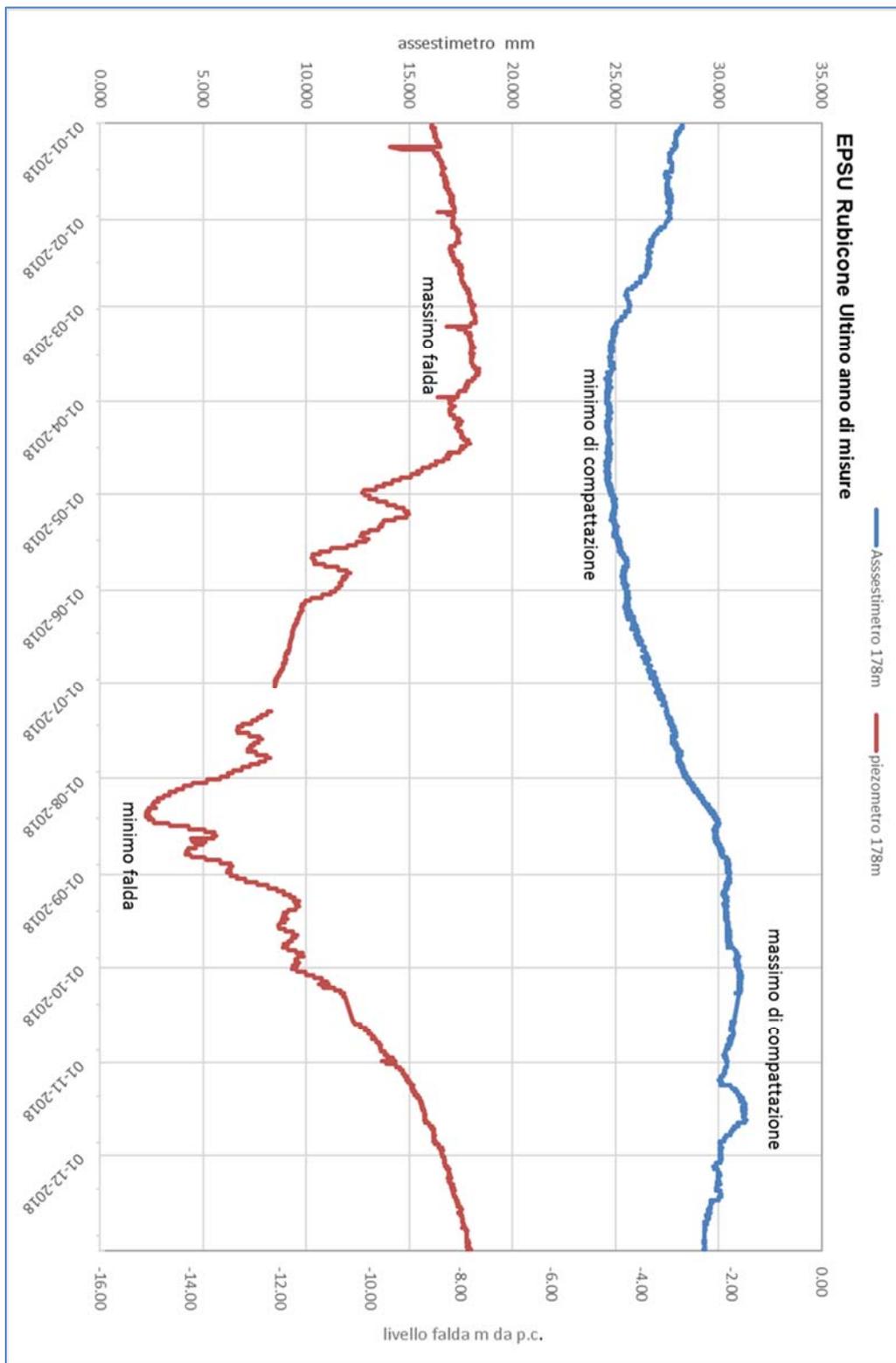


Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche

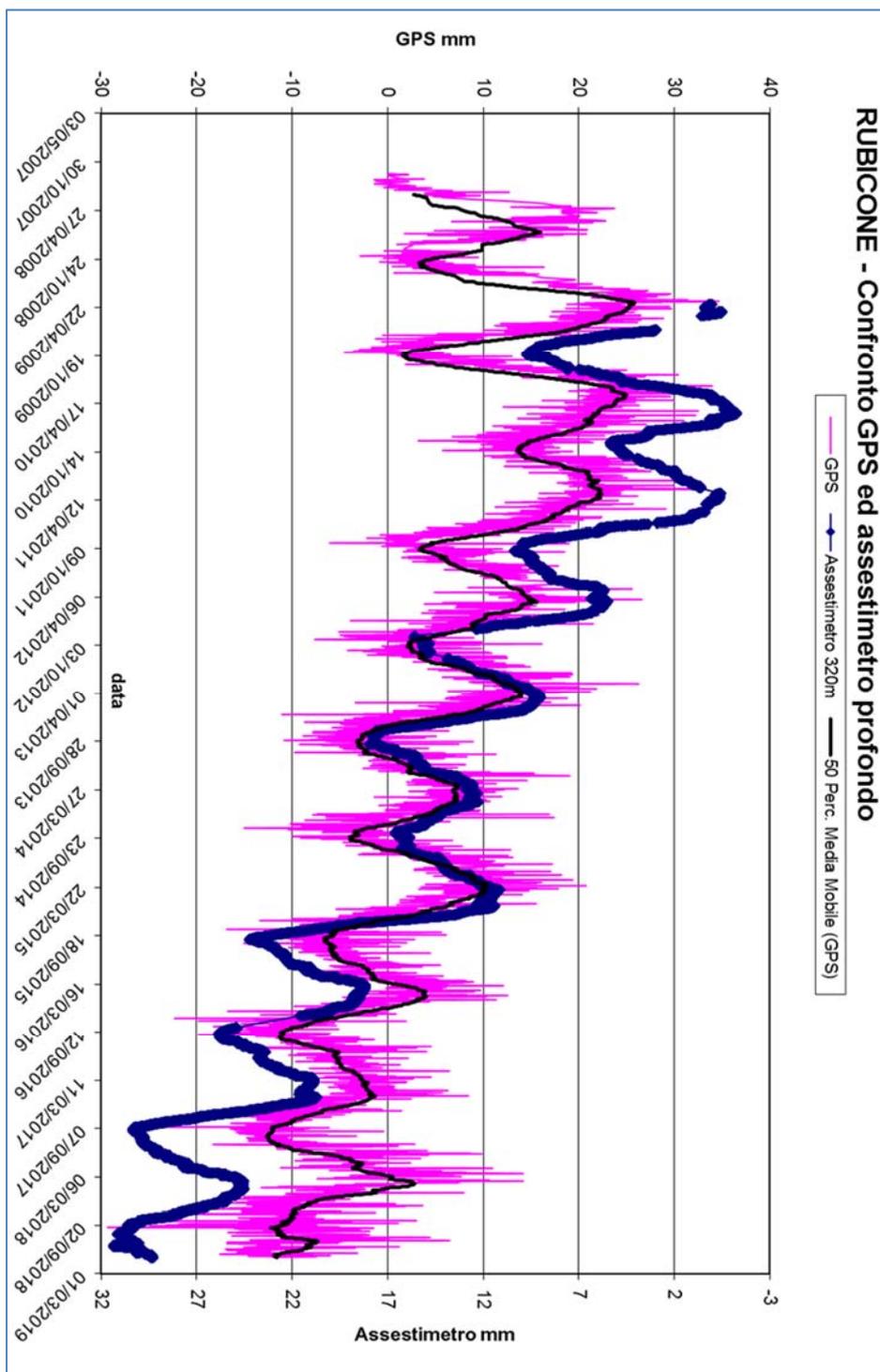


Figura 8B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche

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:

- assestimetro - 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 9B mentre la Figura 10B 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. In 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 corso del 2018.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro 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 11B) 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 del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. I 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.

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 ± 1 mm, con una punta massima di compattazione di circa 1.5 mm registrata all'inizio del 2012.

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

Nel corso del 2018 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/inizio agosto), per ritornare poi a un valore di circa 1 mm (compattazione) nel periodo autunno-invernale.

Alla fine del 2018 l'assestimetro registra, quindi di nuovo, una compattazione di ca. 1 mm con, una compattazione complessiva totale nell'anno quasi nulla (Figura 12B).

Se si prendono in esame tutte le misure assestimetriche registrate nei 10 anni e poco più di osservazioni in questa stazione, queste ultime mostrano, analogamente a quelle della stazione più a sud di Falconara, una situazione del terreno sostanzialmente stabile, con una compattazione complessiva pressoché nulla (-0.007 mm/anno), 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. 0.1 mm/a. A sua volta la velocità media di compattazione stimata con regressione lineare dei dati della serie assestimetrica è praticamente nulla (0,007 mm/a). L'esame comparato delle due serie di misure assestimetriche e da CGPS (Figura 13B) 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 del CGPS. 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 CGPS mostrano una buona correlazione con gli andamenti stagionali della falda. La curva assestimetrica si presenta, però, sfasata anche rispetto a quella piezometrica, raggiungen-



do il minimo (massima espansione) circa quattro mesi dopo il massimo del livello piezometrico (Figura 11B e Figura 12B). Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal ritardo con cui si contrae o rigonfia un grosso strato d'argilla di circa 32 m (Figura 10B) 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 o contrazione degli strati di terreno causati dalle variazioni del livello d'acqua nella falda (sollevamento del terreno in coincidenza dei massimi della 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 13B):

- 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 11B) 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 ± 7 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 per il 2018 nei mesi di febbraio, luglio e ottobre.

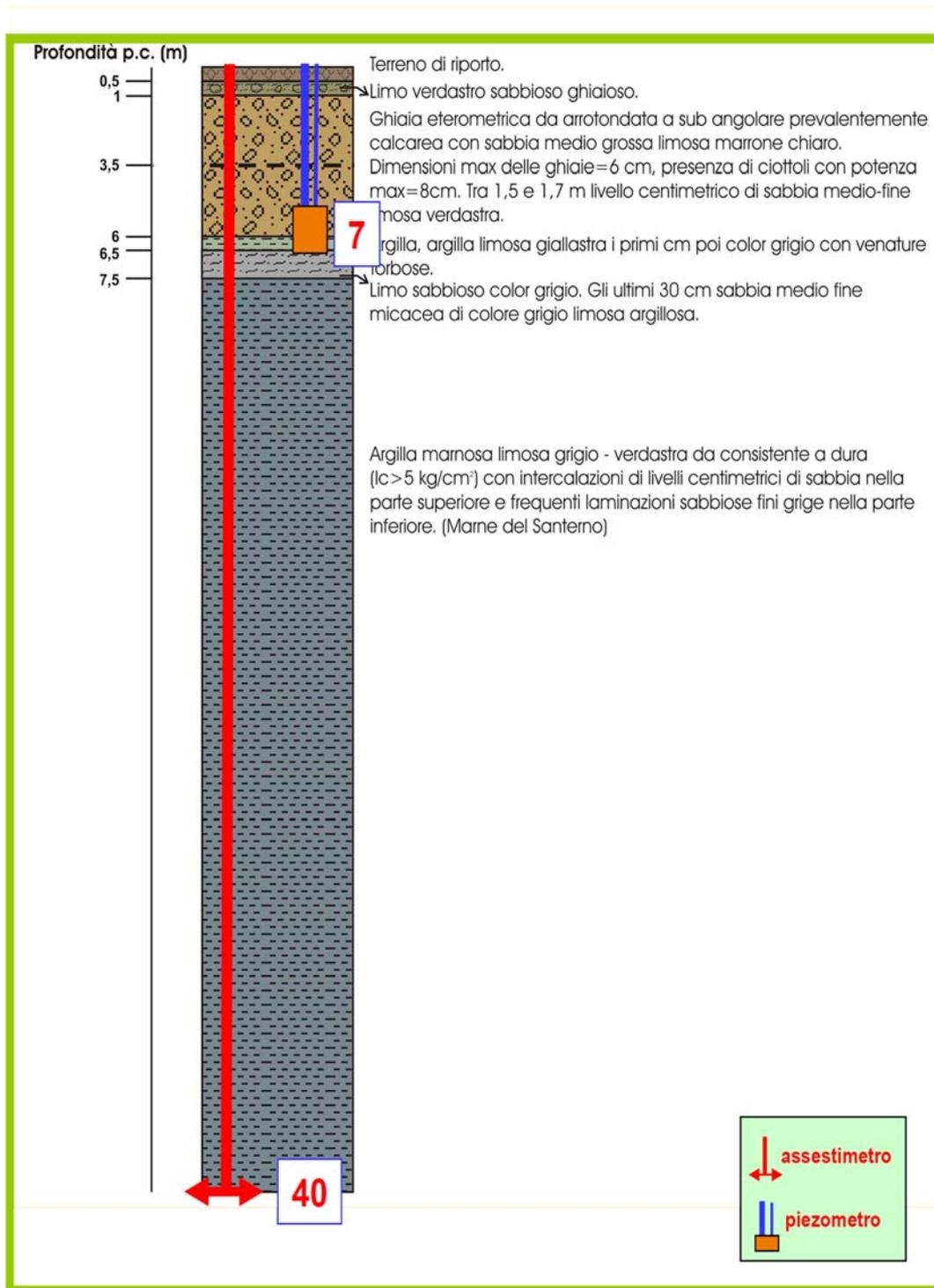


Figura 10B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Fano

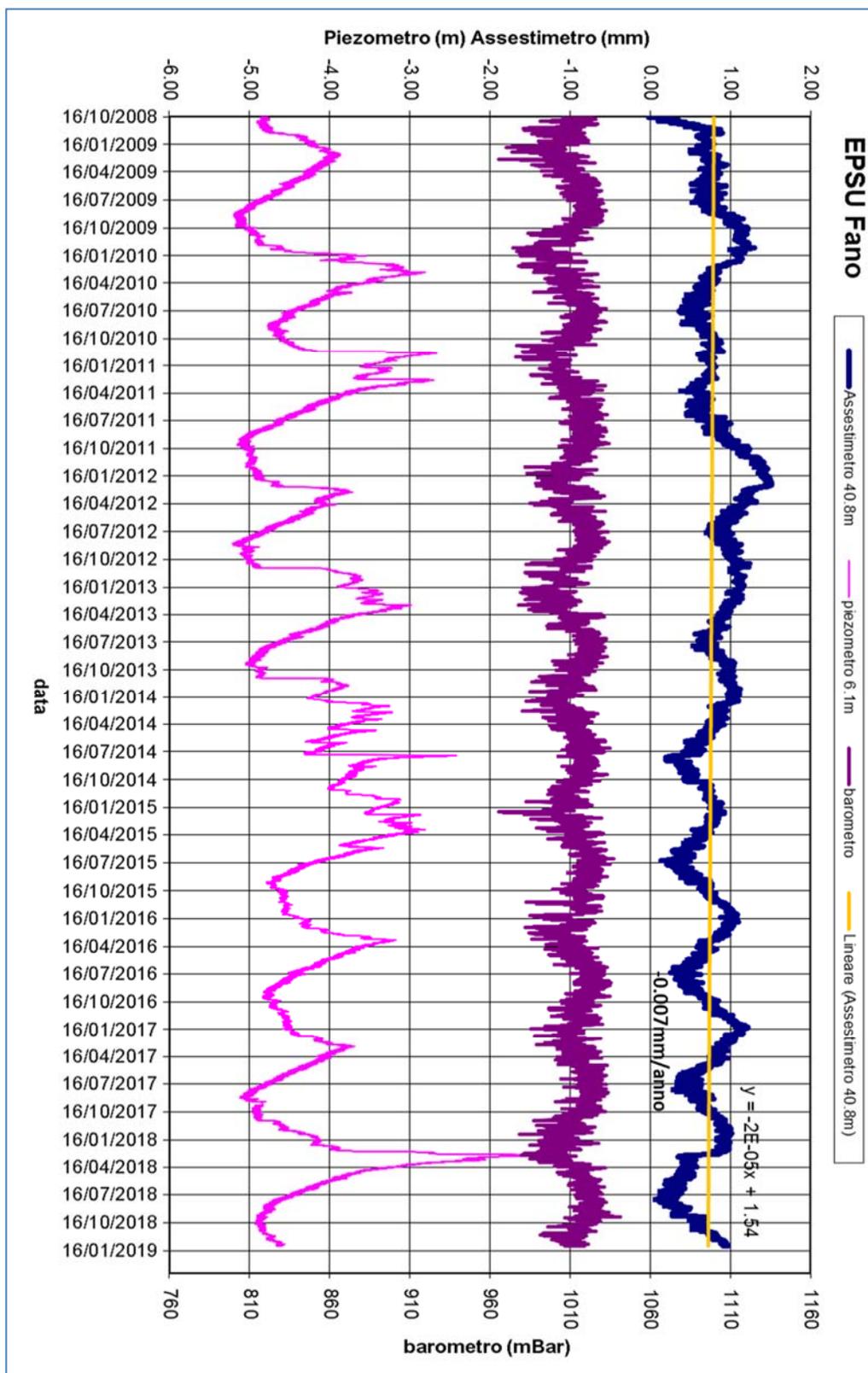


Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche

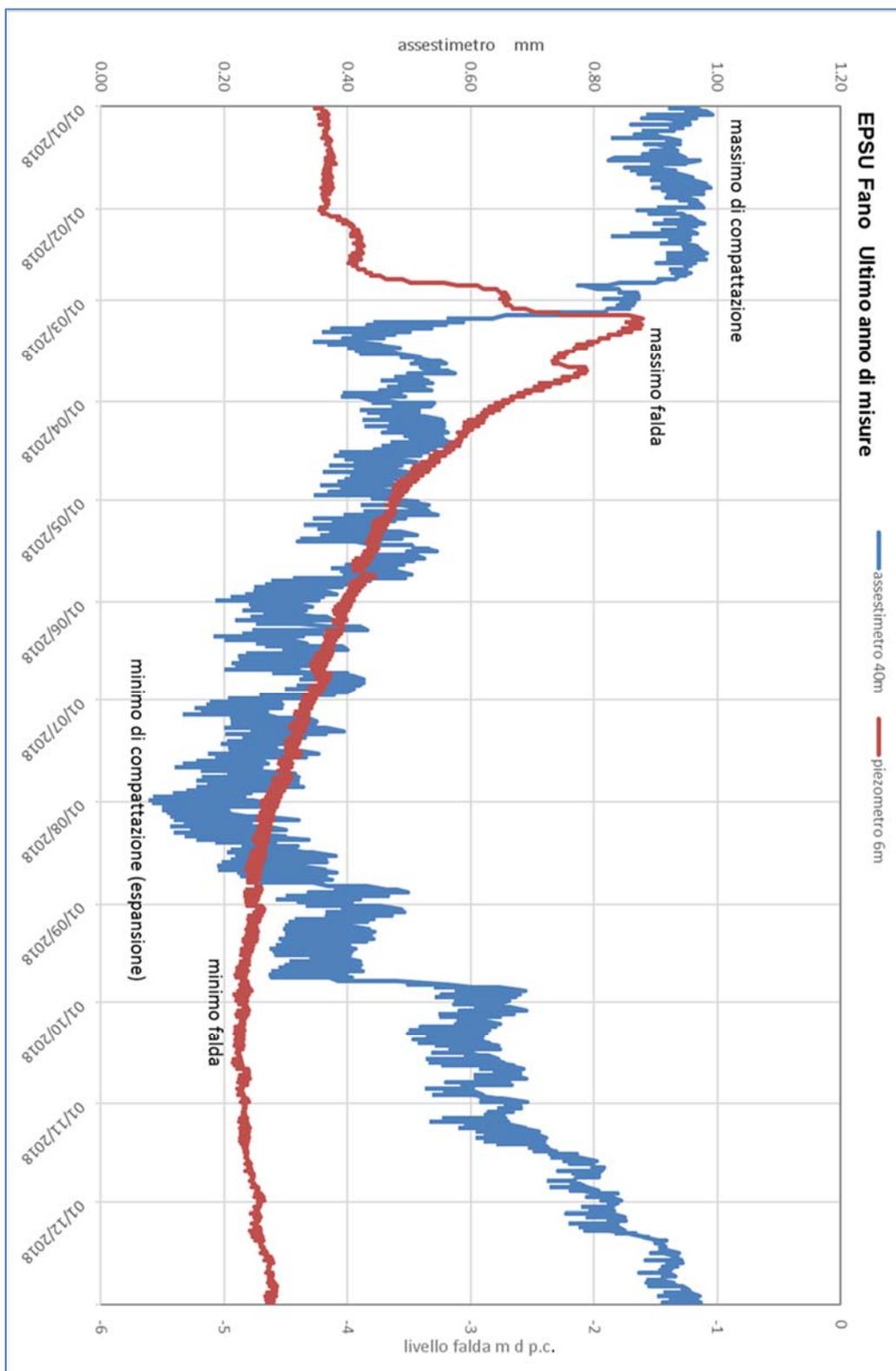


Figura 12B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimentriche

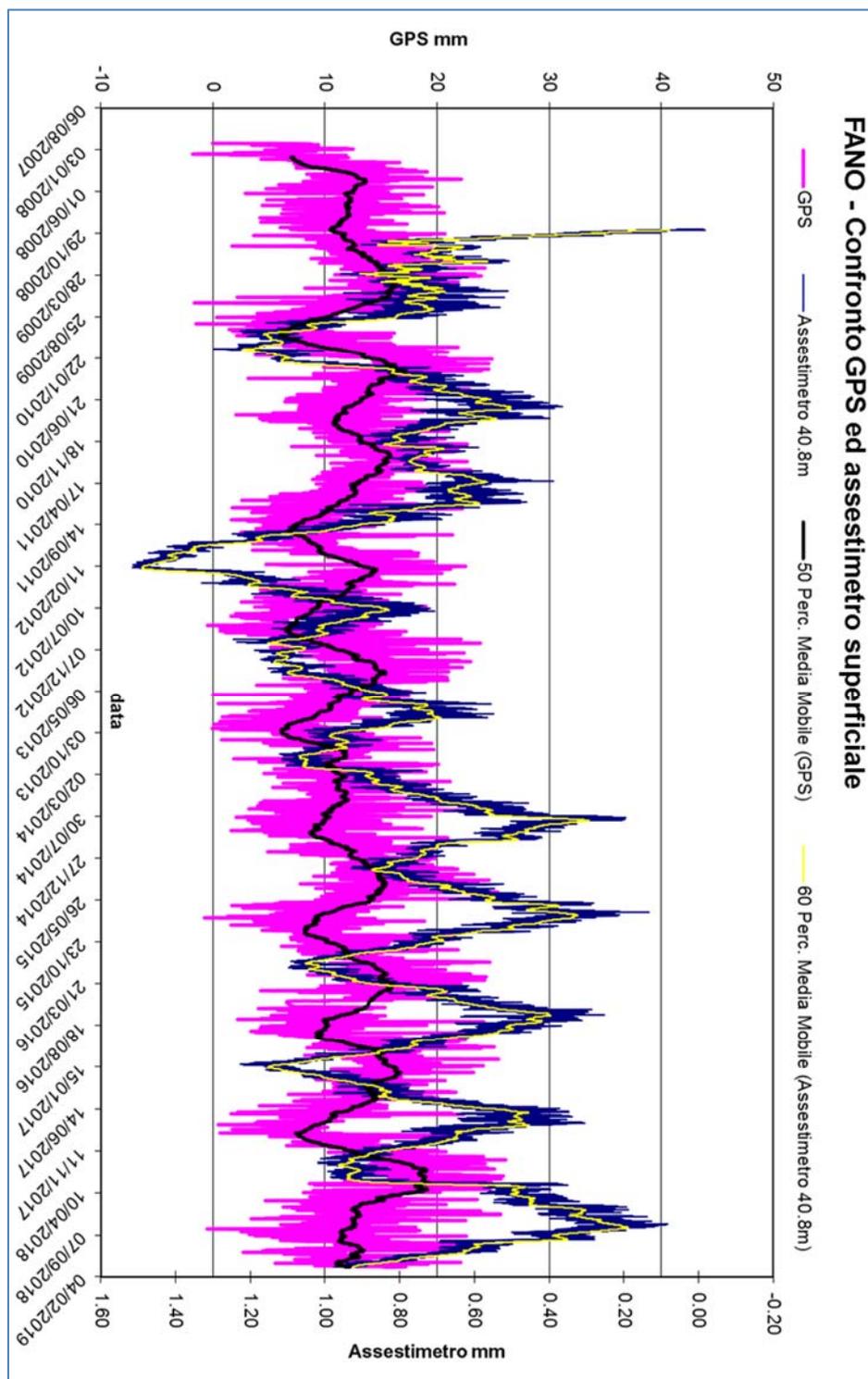


Figura 13B - Stazione EPSU di Fano: confronto fra misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche

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: 21 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 14B, mentre la Figura 15B riporta la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico.

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

La raccolta dati di questa stazione è iniziata il 16 ottobre 2008.

A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" dei sensori di misura.

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

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

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

L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stata effettuata nell'ottobre 2018.

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 16B). 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, valori 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 assestometriche è caratterizzata da una curva ad andamento oscillatorio molto ben correlabile con le variazioni di livello della falda d'acqua monitorate a 22 metri di profondità, dal piezometro nell'ultimo anno (Figura 17B).

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 compattazione 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 CGPS (Figura 18B), 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 regressione lineare dei dati CGPS risulta pari a -0.28 mm/a (ovvero leggerissimo abbassamento della superficie del suolo).

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 18B):

- 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 2018 è stata effettuata la manutenzione ordinaria delle apparecchiature nei mesi di feb-

braio, luglio e ottobre. In tutte le occasioni si è misurato manualmente con freattimetro 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.

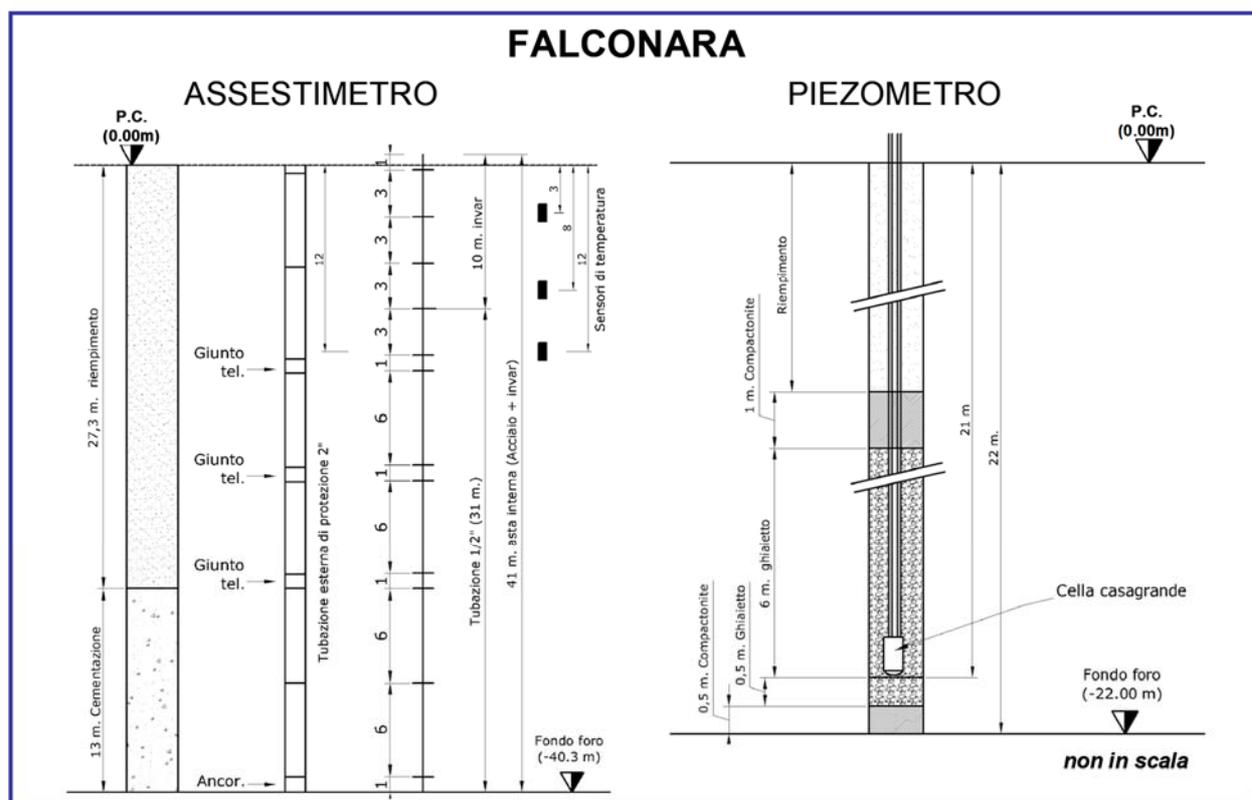


Figura 14B - Stazione della stazione EPSU di Falconara

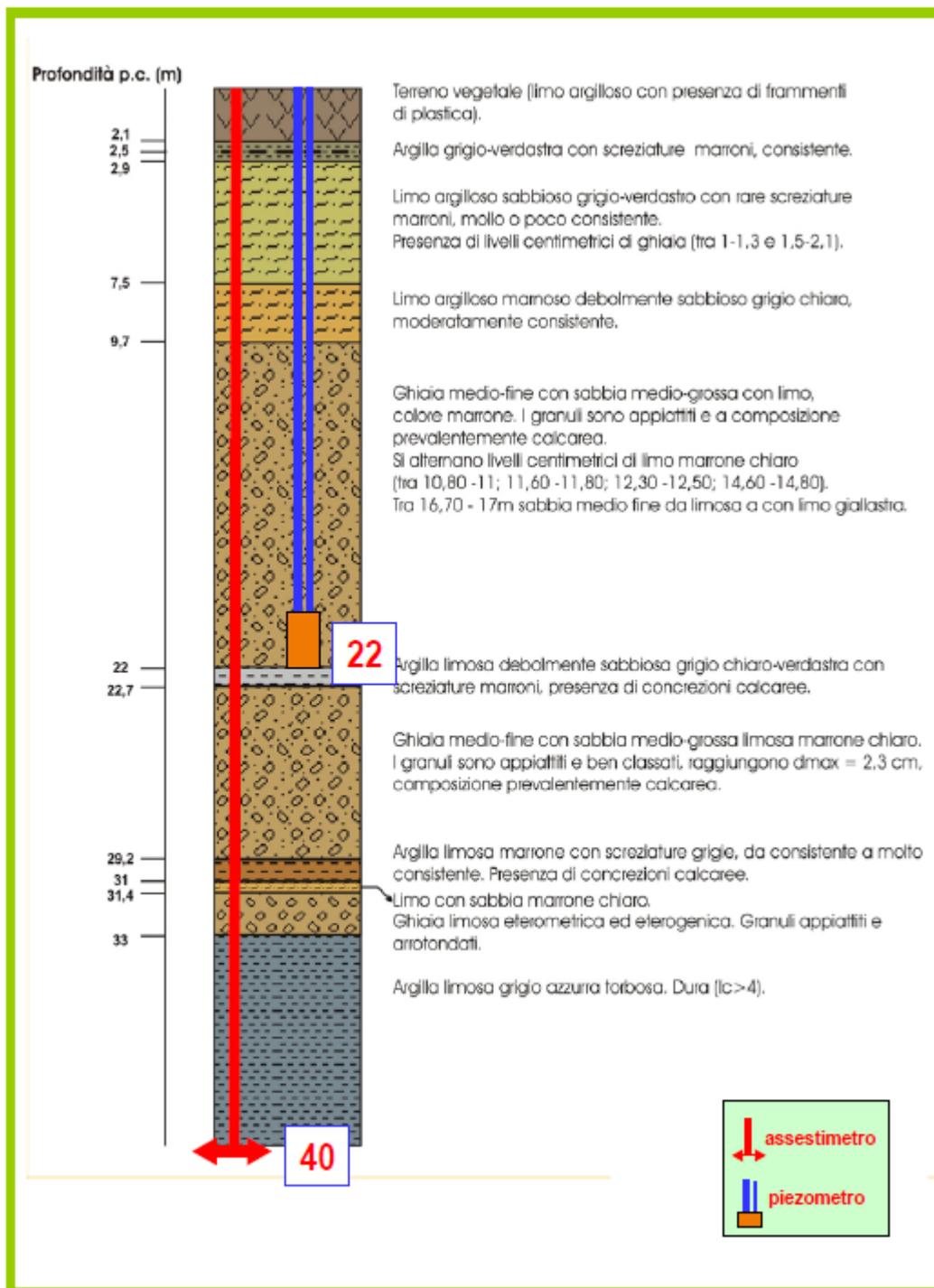


Figura 15B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

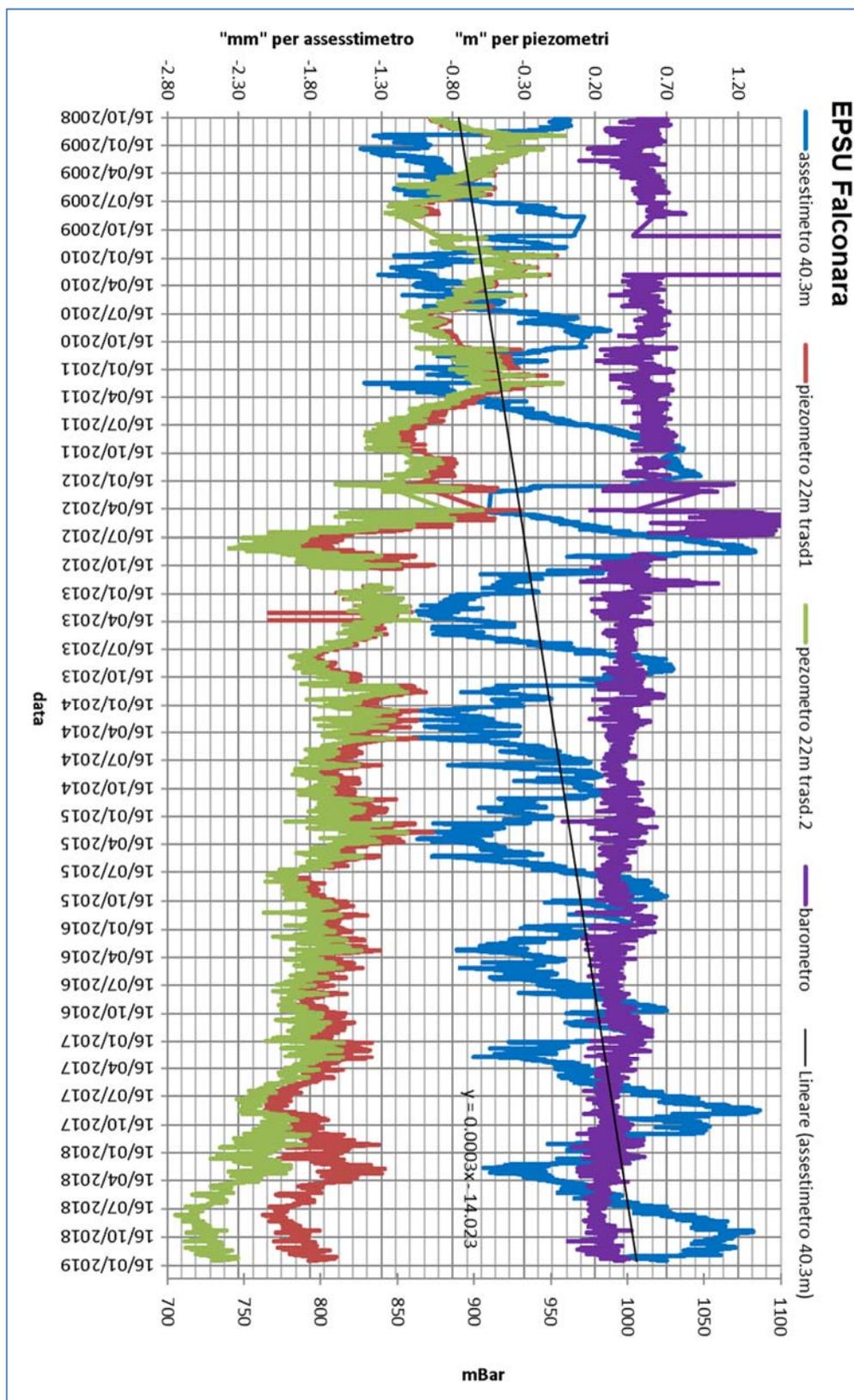


Figura 16B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche

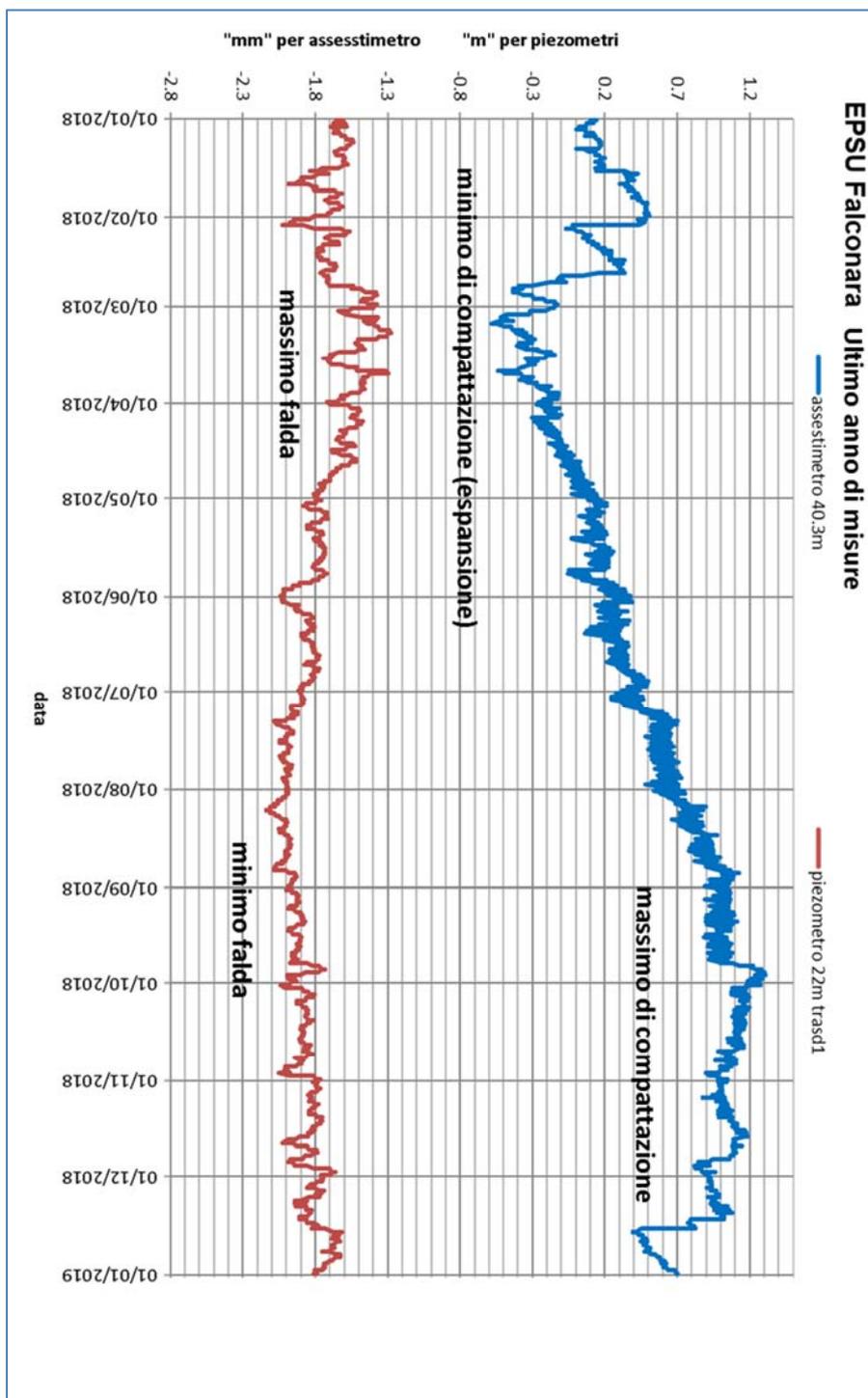


Figura 17B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche

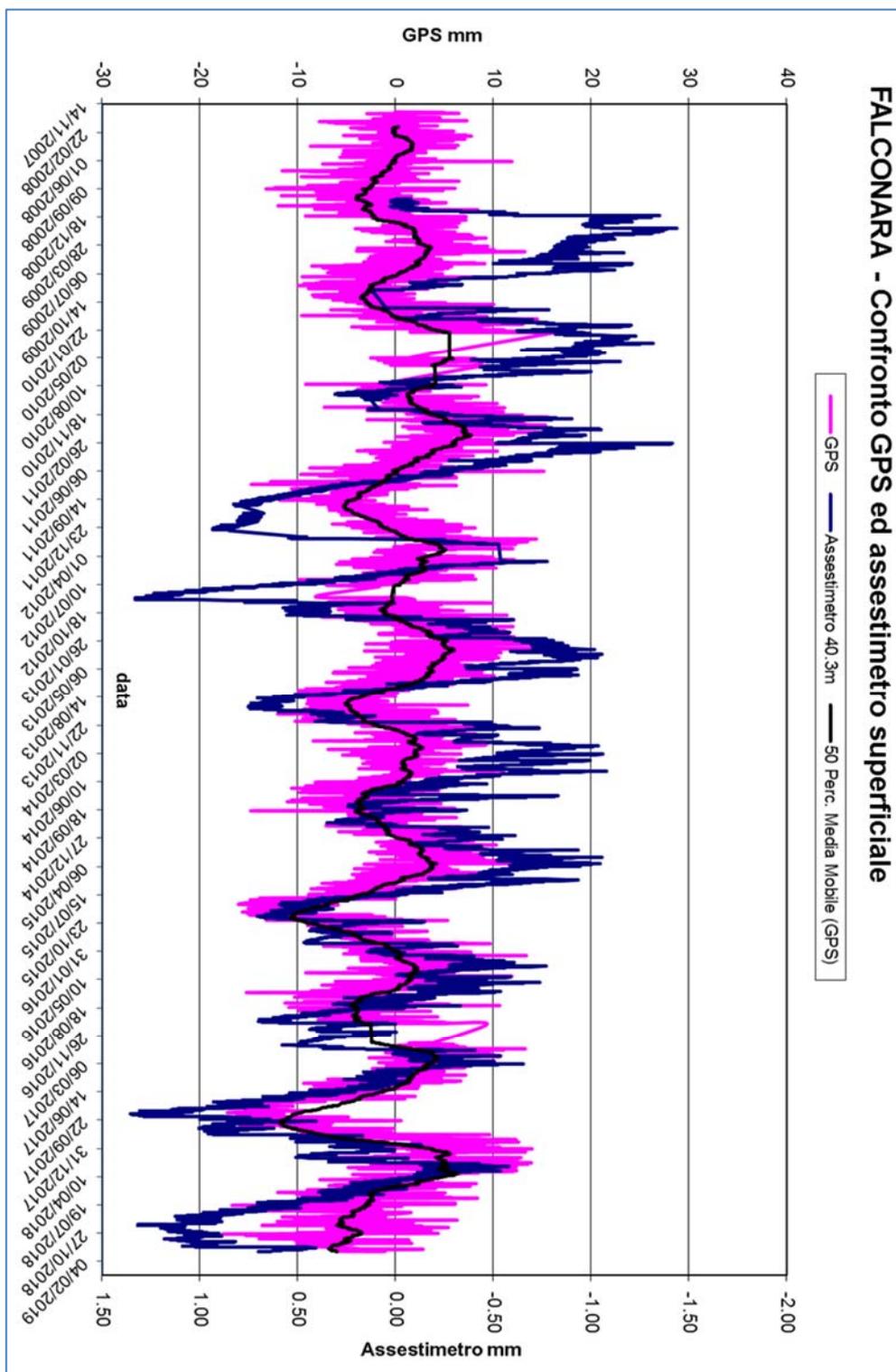


Figura 18B - Stazione EPSU di Falconara: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimentriche

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



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 (contrazioni del terreno), infatti, si hanno all'incirca a settembre/ottobre di ogni anno dopo circa 1.5 / 2 mesi dai minimi livelli di falda; 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 avvenuti 1.5/2 mesi prima. 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 2018, dopo 9.73 anni di funzionamento, misurava, infatti, una compattazione complessiva (rispetto allo zero iniziale) di 29.31 mm, che con un semplice calcolo equivale a una velocità media annua di compattazione pari a circa 3 mm/a. Tale valore si riduce leggermente a circa 2.8 mm/a se si elaborano i dati delle misure assestimetriche con una 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 all'interno di uno strato argilloso spesso circa 32 m e scarsamente comprimibile, lo strumento, infatti, nei circa 10 e più anni di funzionamento ha misurato una compattazione complessiva quasi nulla (0.91mm). A tale spessore di litologia argillosa si potrebbero imputare i ritardi nella compattazione espansione del terreno rispetto all'escursione della falda freatica monitorata. La tabella che segue riporta per ciascuna stazione la compattazione complessiva del terreno al 31/12/2018 e la relativa velocità media annua, valutata sempli-



cemente come rapporto fra la misura assestimetrica a fine 2018 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) |
| Rubicone | 9.73 | 29.31 | 3 | n.i. | - |
| Fano | 10.21 | n.i. | - | 0.91 | n.v. |
| Falconara | 10.21 | n.i. | - | 0.69 | n.v. |

n.i. = non installato

n.v. = non valutabile