

Campo di ANNAMARIA

Aggiornamento al 31/12/18

Il campo a gas di Annamaria si trova nella zona meridionale del “Northern Adriatic Contract Area”, a circa 60 km della costa marchigiana, in un’area dove la profondità dell’acqua varia tra 56 e 65 m (Figura 1).

Il campo, situato tra Italia e Croazia, ricade entro due concessioni denominate Production License A.C11.AG (Eni 100%) e “Exploitation Concession SJEVERNI JADRAN”.

La concessione A.C11.AG è stata inizialmente conferita a Eni in data 23/10/1979 per la durata di anni 30, ossia, fino al 23/10/2009; tale scadenza è stata in seguito prorogata al 23/10/2019 con decreto ministeriale del 06/07/2009.

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C11.AG	23/10/2019	Eni	Eni	100%	Marche

Il contesto geologico in cui si colloca l’area di Annamaria è rappresentato dalla fascia di transizione tra l’avanfossa plio-pleistocenica e il relativo avanpaese, con un substrato costituito da una piattaforma carbonatica (Calcari del Cellina) suturata dalle peliti di rampa della F.ne Santerno. A partire dal Pleistocene inferiore, l’area di Annamaria è stata raggiunta dalle frange più esterne del sistema torbido della F.ne Porto Garibaldi e in seguito dalle torbiditi distali della F.ne Carola, che hanno progressivamente colmato il bacino torbido poggiando direttamente in onlap sulla rampa di avanpaese della F.ne Santerno (Figura 2).

La fase esplorativa del campo ha visto prima la perforazione dei pozzi Jadran-16/1A (1979) e Annamaria-1 (1982), che hanno intercettato la culminazione che sarà poi sviluppata dalla piattaforma Annamaria A, e poi del pozzo Annamaria-2 (2002) che ha intercettato la culminazione in seguito sviluppata dalla piattaforma Annamaria B.

Lo sviluppo del campo ha richiesto la perforazione di 6 pozzi (AM1dir, AM2dir, AM3dir, AM4dir, AM5dir, AM12dir) dalla piattaforma Annamaria A, ubicata in acque croate (inizio produzione marzo 2009) e operata da INAgip, e di 6 pozzi (AM6dir, AM7dir, AM8dir, AM9dir,

AM10dir e AM15dir) più uno di monitoraggio (AM11dir) dalla piattaforma Annamaria B, ubicata in acque italiane e operata da Eni.

Su **Annamaria B** sono entrati in produzione per primi i pozzi AM 6dir, AM8dir e AM9dir (marzo 2010), in seguito i pozzi AM10dir (maggio 2010), AM7dir (giugno 2010) e AM15dir (agosto 2010). Nel documento SIA redatto per il progetto di sviluppo, si è riportato un profilo di produzione derivante dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse 3D*) dell'aprile 2006. Tale profilo è riferito alla produzione di entrambe le piattaforme, e ha previsto:

- **piattaforma Annamaria B:** recupero di 8793 MSm³ di riserve producibili in 30 anni con un picco iniziale di produzione giornaliera di circa 1.0 MSm³/g;
- **piattaforma Annamaria A:** recupero di 9337 MSm³ di riserve producibili in 30 anni con un picco iniziale di produzione giornaliera di circa 1.1 MSm³/g.

Nel maggio 2012, è stato fatto un aggiornamento del modello di giacimento *Eclipse (rel. Eni-GISE 07/12 del 31/05/2012, Campo di Annamaria – Studio dinamico di giacimento)* tenendo conto sia dei dati di produzione acquisiti nella prima fase produttiva del campo, sia del previsto completamento della fase di sviluppo del giacimento con la perforazione di ulteriori due pozzi *infilling* nel periodo gennaio - aprile 2013 dalla piattaforma Annamaria B.

Questo nuovo studio ha portato a una riduzione di circa il 31% delle riserve a vita intera del campo. Infatti, con riferimento alla produzione di entrambe le piattaforme, si è stimato:

- **piattaforma Annamaria B:** recupero di 8022 MSm³ di riserve producibili in 30 anni con un picco iniziale di produzione giornaliera di circa 1.0 MSm³/g;
- **piattaforma Annamaria A:** recupero di 4415 MSm³ di riserve producibili in 30 anni con un picco iniziale di produzione giornaliera di circa 1.1 MSm³/g.

Un ulteriore aggiornamento del modello di giacimento *Eclipse* è stato successivamente fatto nel dicembre 2015 (*rel. Eni-GISE 16/15 del 15/12/2015, Annamaria Field – Dynamic Model Update*) tenendo conto dei dati di produzione e di pressione acquisiti.

Con riferimento alla produzione di entrambe le piattaforme si è stimato:

- **piattaforma Annamaria B:** recupero di 3815 MSm³ di riserve producibili al 31 dicembre 2039 (*caso Do Nothing*);
- **piattaforma Annamaria A:** recupero di 3890 MSm³ di riserve producibili al 31 dicembre 2039 (*caso Do Nothing*).

Infine, allo scopo di aggiornare, ulteriormente, il modello geomeccanico del campo si è aggiornato nuovamente il modello *Eclipse* di giacimento nel dicembre 2017 (*rel. Eni-GISE 19/17 del 12/2017, Annamaria Complex – Nota Tecnica – Studio di giacimento per studio geomeccanico*) tenendo conto dei dati di produzione e di pressione acquisiti.

Con riferimento alla produzione di entrambe le piattaforme si sono stimate 7528 MSm³ di riserve producibili al 2030 così suddivise:

- **piattaforma Annamaria B:** recupero di 3546 MSm³ di riserve producibili al 2030;
- **piattaforma Annamaria A:** recupero di 3982 MSm³ di riserve producibili al 2030.

La produzione totale di campo al 31/12/2018 è stata di 5726 MSm³ (Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7) così ripartita fra le due piattaforme:

- Annamaria A: 2891 MSm³ (Figura 3);
- Annamaria B: 2835 MSm³ (Figura 4).

Per alcuni livelli rappresentativi del campo, la Figura 8 riporta un confronto fra le pressioni rilevate sul pozzo Annamaria 11B che sono registrate in continuo con “*Permanent Pressure Gauges*” (PPG), e i corrispondenti valori di pressione calcolati dal modello *Eclipse* (dicembre 2017); tale confronto mostra una generale stabilità dei valori di pressione e in alcuni casi registra una ri-pressurizzazione dei livelli stessi.

Per il giacimento di Annamaria la previsione iniziale di subsidenza allegata al SIA è stata eseguita con modello geomeccanico a elementi finiti (FEM), adottando criteri del tutto cautelativi e impiegando metodologie e strumenti in linea con il più avanzato stato dell’arte in campo internazionale (*Campo di Annamaria – Modello elasto-plastico di subsidenza, rel. ENI-TERA 16/2007, giugno 2007*).

Detto modello ha stimato in 90 cm al 2038 (anno di fine produzione) il valore massimo di subsidenza nel caso dello scenario di riferimento ritenuto più probabile (M2).

Alla stessa data e per lo stesso scenario la curva d’iso-subsidenza di 2 cm è stata prevista estendersi per circa 12 km dal centro del campo¹. Al 2060 il valore massimo di subsidenza è

¹ Nel 2002 Eni ha nominato una Commissione Scientifica Internazionale (CSI), presieduta dal Prof. E. Boschi e costituita da esperti di fama internazionale, per valutare gli effetti dell’estrazione di gas dai giacimenti off-shore sulla stabilità delle coste del Ravennate e, in generale, di tutto il Nord Adriatico. In merito all’estensione del cono di subsidenza, la CSI ha concluso che la linea d’iso-subsidenza di 2 cm è da considerarsi “*the limit of any physical identification of induced subsidence effects*”. Tutti gli studi e le conclusioni della CSI sono stati poi resi pubblici con il volume “*Land Subsidence – Special Volume*” edito in occasione del *7th International*

stato previsto essere 86 cm con la curva d'iso-subsidenza di 2 cm prevista estendersi per circa 15 km dal centro del campo.

I risultati dello studio hanno mostrato, quindi, come il cono di subsidenza si esaurisca a una distanza di oltre 45 km dalla costa più vicina dopo 22 anni dalla fine della produzione del campo. Questo risultato è stato, di fatto, lo stesso per tutti gli scenari considerati e non è stato sostanzialmente modificato considerando anche una possibile interferenza con altri campi a gas in produzione nelle acque croate.

Per accertare, infatti, gli effetti di possibili interazioni di tipo idraulico e/o meccanico con giacimenti limitrofi è stato eseguito uno studio di previsione di subsidenza considerando anche i campi a gas di Ida e Ika in produzione nelle acque croate (*Campo di Annamaria – Studio di previsione di subsidenza e interazione con i campi di Ida e Ika, Management Summary, Relazione Eni-TERA 11/2008, maggio 2008*).

Tale studio è stato trasmesso da Eni al MATTM nell'ambito della documentazione integrativa del SIA del campo "Annamaria" con nota del 19/06/2008.

I risultati di questa nuova valutazione sono stati del tutto in linea con quelli ottenuti nella previsione di subsidenza indotta dalla produzione del solo campo di Annamaria. Nel caso di riferimento più probabile (*M2*), infatti, la subsidenza calcolata al 2038 è stata pari a 92 cm, valore che è raggiunto alla fine della produzione e tende lievemente a ridursi negli anni successivi; al 2060 l'estensione della linea d'iso-subsidenza dei 2 cm è risultata estendersi di circa 15 km dal centro del campo, confermando come il fenomeno si esaurisca a oltre 45 km dalla linea di costa. A seguito della revisione del modello di giacimento del maggio 2012 è stato poi eseguito un nuovo aggiornamento del modello geomeccanico (*Campo di Annamaria – Modello elasto-plastico di subsidenza e interazione con i campi di Ida e Ika, Management Summary, Relazione Eni-TERA 03/2013, aprile 2013*).

Le previsioni di subsidenza sono state eseguite per tre differenti scenari di compressibilità C_m : uno scenario più probabile (*Medio*), uno scenario conservativo (*Up*) e uno scenario ottimistico (*Low*). I risultati della simulazione riferiti allo scenario "*Up*", più conservativo, hanno dato un valore di subsidenza massimo di 127 cm a fine produzione (2040) che si riduce a 119

Symposium on Land Subsidence – Shanghai (P.R. China) – 23-38 Oct. 2005. A partire da tale data Eni considera nei propri studi la linea d'iso-subsidenza di 2 cm come il contorno esterno che delimita il cono di subsidenza.

cm a fine simulazione (2070). Per tutti gli scenari previsionali il fenomeno di subsidenza è previsto esaurirsi, comunque a oltre 30 km dalla linea di costa.

Per migliorare il *match* tra le misure CGPS acquisite in piattaforma e le previsioni modellistiche di subsidenza nel 2017 si sono aggiornati sia il modello di giacimento (statico e dinamico) che il modello geomeccanico (*Campo di Annamaria – Modello elasto-plastico di subsidenza - Management Summary, Relazione Eni-TERA 05/2017, dicembre 2017*).

Le previsioni di subsidenza sono state fatte considerando due possibili scenari di sviluppo:

- *Do Nothing (DN)*;
- Perforazione di 4 *Development Wells (4DW)*, con data di fine produzione al 1° gennaio 2031 e fine simulazione al 1° gennaio 2061, 30 anni dopo la chiusura di pozzi.

Il comportamento meccanico delle rocce è stato descritto, invece, secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica “*Soft Soil Creep*” (VNM) che è stata formulata arricchendo il classico modello elasto-plastico “*Modified Cam-Clay Model*” (MCCM) con la componente viscosa della deformazione.

Dall’analisi dei risultati riportati in Tabella 1 emerge che:

Tabella 1 – Subsidenza massima ed estensione del fenomeno.

Data	Scenario di Sviluppo	Subsidenza Max (cm)	Estensione Max (km)	Distanza Min da Costa (km)
01-gen-17	\	59	22	51
01-gen-31	DN	118	25	46
01-gen-61		112	29	44
01-gen-31	4DW	163	25	46
01-gen-61		157	29	44

- in entrambi gli scenari di sviluppo il massimo abbassamento del fondale marino si verifica tra le piattaforme A e B alla data di fine produzione (2031);
- nello scenario **DN** la massima subsidenza prevista è rispettivamente di 118 cm a fine produzione e di 112 cm a fine simulazione; nello scenario **4DW**, invece, tali valori aumentano rispettivamente a 163 cm (fine produzione) e a 157 cm (fine simulazione). Il modesto rebound del fondale marino che il modello prevede in entrambi i casi è causato dalla spinta degli acquiferi che ripressurizzano gli strati depletati dalla produzione di gas;

- a fine simulazione (2061) la distanza minima dalla costa del cono di subsidenza, definito dalla isolinea dei 2 cm, è pari a 44 km ed è la stessa per entrambi gli scenari considerati (Figura 9).

In ottemperanza a quanto prescritto al punto C del *DEC/2008-0000271 del 12/12/08*, nel periodo 4/2009-12/2009 è stato eseguito un rilievo batimetrico in un'area del campo di Annamaria comprendente le piattaforme di Annamaria A e Annamaria B, per un'estensione totale pari a circa 1200 km². Il risultato di questo primo rilievo ha permesso una caratterizzazione geomorfologica del fondale caratterizzato da una profondità minima di -41 m nella parte NE che declina fino a -68 m di profondità nella parte meridionale. L'area del rilievo si può idealmente dividere in due parti, separate approssimativamente dalla batimetrica di -56 m:

- la parte settentrionale è abbastanza regolare a bassa pendenza, ad eccezione della parte di NE, dove sono visibili delle depressioni lineari;
- la parte meridionale invece è più aspra e articolata, caratterizzata da strutture che sembrerebbero essere tipiche di un paleo-delta.

Le pendenze del fondale sono generalmente inferiori a 0.5°; i valori più elevati (>2°) sono presenti nella parte settentrionale.

La parte settentrionale è, quindi, delimitata a sud (intorno alla batimetrica di -56 m) da un brusco cambiamento nella morfologia del fondale oltre il quale si rilevano strutture meandri-formi. È possibile ipotizzare dall'andamento batimetrico generale come queste strutture appartengano al paleo-delta del fiume Po, con una parte settentrionale rappresentativa della piana alluvionale e deltizia e una parte meridionale rappresentativa di morfologie di fronte deltizia e di prodelta.

L'acquisizione del rilievo batimetrico *multibeam* del 2009 è stata fatta non solo per una caratterizzazione geomorfologica del fondale, ma anche per ottenere un "termine di confronto" prima dell'avvio della produzione del campo, abbracciando un'area d'estensione tale da includere tutta la possibile superficie di disturbo indotta dalla subsidenza così come prevista in fase di modellazione.

Nel corso del 2016 si è proceduto, perciò, all'acquisizione di un nuovo rilievo batimetrico della sola zona italiana per il controllo e taratura delle previsioni del modello geomeccanico.

Un primo confronto per la zona monitorata (Figura 10) tra le quote rilevate nel 2009 e nel 2016 (Figura 11) mostra che il fondale marino è soggetto a un abbassamento ben definito

nell'intorno della piattaforma Annamaria B (rapporto "AM711" del survey batimetrico 2016 di Lighthouse). È stata poi analizzata la subsidenza misurata mediante le batimetrie del 2009 e del 2016 rispetto a quanto simulato dal modello geomeccanico. In Figura 12 si mostra il confronto in termini di linee di iso-subsidenza (5, 15, 30 e 50 cm) tra il 2009 e il 2016: si osserva un'accurata riproduzione delle misure da parte del modello. Nella Figura 13 si riporta, inoltre, il confronto lungo 2 sezioni trasversali: una parallela alla linea mediana (NW-SE) con azimut di 315°, l'altra perpendicolare (NE-SW) con azimut di 225°. Dato che entrambe queste sezioni passano per la piattaforma Annamaria B, si riporta anche il valore di subsidenza registrato dalla stazione CGPS che, relativamente al periodo 2009-2016, corrisponde a 65 cm.

Dalla Figura 13 si nota come il modello riproduca accuratamente la subsidenza misurata con le batimetrie lungo la sezione NE-SW, compatibilmente con l'incertezza associata alle misure. Lungo la direzione NW-SE si ha una perfetta corrispondenza tra i risultati modellistici e le misure batimetriche nel lato SE, mentre si riscontra una sovrastima del profilo calcolato rispetto a quello misurato a NW, indicativa del grado di cautela adottato nel realizzare il modello geomeccanico.

In conclusione, i valori di massima subsidenza ricavati dai rilievi batimetrici sono in linea sia con quelli previsti dal modello geomeccanico, sia con l'abbassamento della piattaforma Annamaria B registrato dalla stazione CGPS. L'estensione areale del cono di subsidenza, ricavata dalle misure batimetriche, risulta anch'essa in linea con quella prevista dal modello geomeccanico.

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 dei 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 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 Ortona 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.

Per il tratto di costa da Cervia a Pesaro, monitorato per controllare la stabilità del litorale emiliano-romagnolo, sono disponibili 13 serie di misure, includendo la campagna del 2014. Queste ultime sono state eseguite con cadenza annuale dal 1999 al 2009 (10 serie) e a cadenza triennale a partire dal 2011.

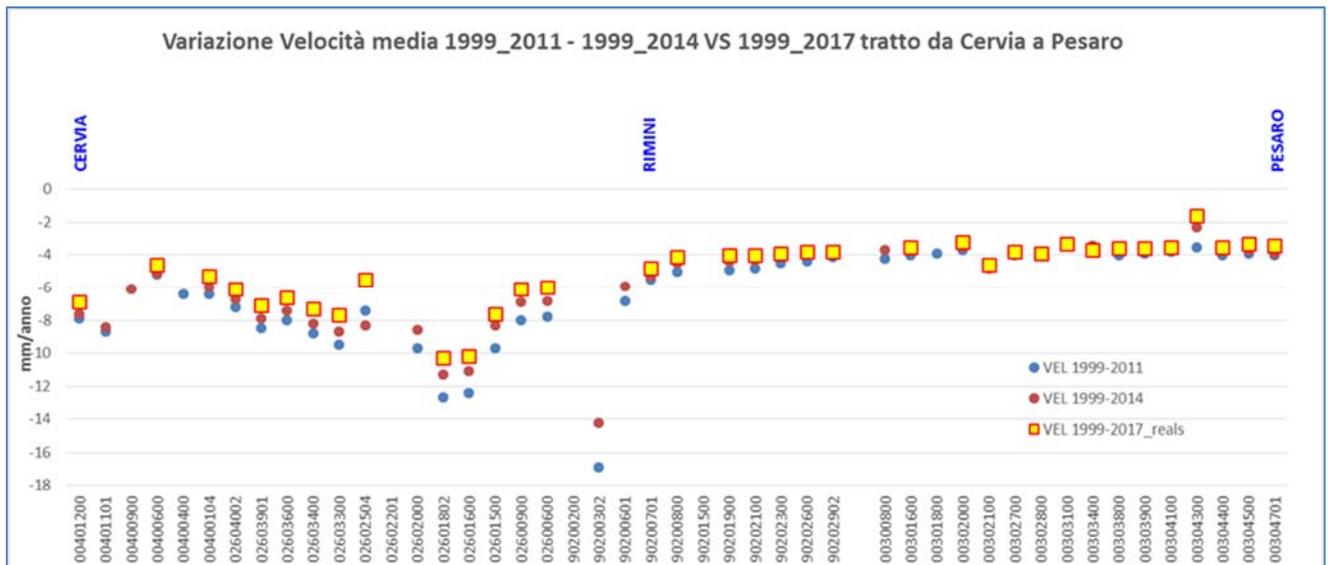
La campagna del 2001 non è utilizzabile essendo stata acquisita con un'origine diversa rispetto a tutte le altre.

Le velocità medie di subsidenza, stimate con regressione lineare e relative ai capisaldi di tale tratto di costa, sono riportate in Figura A per i seguenti periodi: 1999-2011, 1999-2014 e 1999-

2017. Il confronto fra i valori rilevati dei tre periodi mostra come negli ultimi anni dette velocità siano generalmente in diminuzione.

Il fenomeno, già osservato con le misure del 2014, è stato ulteriormente confermato dai dati acquisiti con la campagna di livellazione del 2017.

Figura A –Tratto Cervia-Pesaro: velocità medie di subsidenza



Le misurazioni di campagna si sono svolte nel pieno rispetto delle specifiche tecniche, con il controllo periodico dei supervisor e con la verifica di chiusura di tutti i tratti in andata e ritorno, nonché di tutti i poligoni realizzati. I parametri matematici della compensazione rientrano nei canoni previsti, sia per i valori di chiusura, sia per i valori legati alla propagazione dell'errore. Come programmato in precedenza, l'ente certificatore ha iniziato, da questa campagna, ad introdurre la compensazione sviluppata utilizzando i valori di velocità desunti dalle stazioni CGPS permanenti della rete Eni. A questo proposito, però, è necessario anche segnalare che i valori delle quote dei capisaldi ottenuti con questo procedimento possono differire da quelli che si ottengono con la compensazione classica, che è invece vincolata a un solo caposaldo di riferimento. In effetti, ciò è stato osservato nel caso dei risultati del rilievo 2017, in cui le misure delle quote di alcuni capisaldi sono risultate maggiori dei corrispondenti valori rilevati con la livellazione del 2014. Valori questi ultimi che erano stati ottenuti con la compensazione classica vincolata al solo caposaldo di Treviso.

I risultati del rilievo 2017 sono, comunque, compatibili con il quadro generale di una diminuzione della velocità di subsidenza osservata anche con il monitoraggio SAR.

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 V_a^2 di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione nelle seguenti classi di valori:

- 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).

L’elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2014 mostra per l’area in esame un quadro di generale abbassamento, con valori in leggera diminuzione rispetto a quelli misurati nelle campagne fatte fino al 2011. Il 50% dei punti, infatti, ricade nella classe 2, il 45% dei punti in quella 3 e solo il 5% (due capisaldi) ha valori di V_a di poco superiori a 10 mm/a (11.3 mm/a come valore massimo).

Il confronto con i dati di livellazione del periodo 1999-2017 conferma, come già detto, tale rallentamento della velocità di subsidenza, che è diffuso per tutto il tratto analizzato.

Ricade, infatti, nella classe 2 il 60% dei punti analizzati, il 31% dei punti in quella 3, mentre è praticamente invariata la percentuale dei punti appartenenti alla classe 4 (6%, ovvero due soli punti); un solo caposaldo appartiene alla classe 1.

Le campagne future (il prossimo rilievo è previsto nel 2020), insieme al progressivo miglioramento della nuova metodologia di compensazione dei dati di campagna basata sulle velocità delle stazioni CGPS, potranno eventualmente meglio definire i trend di movimento del tratto

² 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 le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

analizzato, al netto di eventuali movimenti anomali localizzati sui singoli capisaldi, movimenti che saranno oggetto di verifica durante le prossime campagne di misura.

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 14).

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 la certificazione.

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 di Annamaria B, 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 15), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato nella seguente Tabella 1.

Tabella 1 – 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
Annamaria-B	29.93	18.11	-108.59	29.83	17.77	-106.45	0.1	0.34	-2.14

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 d'avere un numero sufficiente d'osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza

sulle misure e 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 ad un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

- dataset < 12 mesi: 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.

Nel caso di Annamaria B (p.ma in acque italiane), sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale pari a -106.98 mm/a (Figura 15, Figura 18) in diminuzione rispetto a quanto riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-109.6 mm/a al 2017).

Nell'andamento temporale di tale dataset di misure CGPS, inoltre, si può osservare una variazione di velocità, che può essere correlata con una variazione della storia produttiva del campo (Figura 17).

In particolare:

- la velocità media di subsidenza totale è di circa -59.31 mm/a nel periodo giugno 2010 - giugno 2013;
- la velocità media di subsidenza totale è di circa -152.53 mm/a nel periodo giugno 2013 - giugno 2016;
- la velocità media di subsidenza totale è di circa -61.54 mm/a nel periodo giugno 2016 - dicembre 2018.

Si riporta in Figura 16 anche la serie storica di misure CGPS rilevate sulla piattaforma Annamaria A (acque croate). L'elaborazione di tali misure, relative a un intervallo temporale superiore ai 36 mesi, consente di stimare una velocità media di subsidenza totale al 31 dicembre 2018, pari a -74.93 mm/a.

Si segnala altresì che eventuali piccole differenze nelle stime delle velocità, che si possono verificare rielaborando in epoche successive i dati CGPS, dipendono anche dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta sia l'elaborazione di un modello periodico più attendibile, sia la ridefinizione degli outliers, che sono determinati mediante il test a tre sigma su tutta la serie storica esistente.

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.

I valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico del dicembre 2017 sono stati confrontati con quelli acquisiti dal CGPS (aggiornati al 31/12/2018) senza che questi ultimi siano

stati depurati dalla componente di subsidenza naturale². Come mostrato in Figura 19, l'accordo è decisamente buono a conferma dell'attendibilità dell'attuale modello di subsidenza. Allo scopo di monitorare *in-situ* la compattazione delle rocce serbatoio, si è proceduto in data 02/12/2018 al rilievo con FSMT dei *marker* installati nel pozzo di Annamaria B11 (precedenti rilievi in data 16/03/2010, 19/09/2010, 17/03/2011, 06/04/2012, 24/07/2013, 30/09/2014, 31/05/2015, 24/07/2016 e 07/09/2017), come prescritto dal *DEC/2008-0000271 del 12/12/08* e dal "*Piano di monitoraggio dei fenomeni geodinamici*" redatto da Eni e inviato a MATTM il 14/07/2009.

In particolare, considerando solo i marker spacing all'interno dei layer produttivi, le misure realizzate tra settembre 2017 e dicembre 2018 forniscono un'espansione pari a circa 173 mm, così ripartita:

- da 991.00 a 1001.50 m: espansione di 2 mm;
- da 1057.55 m a 1498.55 m: espansione di 173 mm;
- da 1738.00 a 1769.50 m: compattazione di 2 mm.

In Figura 20 e Figura 21 sono riportati i risultati dei monitoraggi FSMT in termini di compattazione/espansione (mm) avvenuta tra coppie di rilievi consecutivi.

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza e i monitoraggi fatti da Eni hanno confermato come eventuali fenomeni di subsidenza connessi alla produzione di gas dal campo di Annamaria non abbiano alcun impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale antistante.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 22 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 23 è presentato un particolare della rete di monitoraggio.

² L'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma, e che viene rilevato sia con la batimetria che con il CGPS, rappresenta la "subsidenza totale" di tale zona. Quest'ultima è causata dal concorso di diversi fenomeni, quali: 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 (evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa). I modelli geomeccanici, invece, valutano la sola "subsidenza antropica" per effetto dell'estrazione del gas e non tengono conto degli altri fenomeni di cui si è detto.

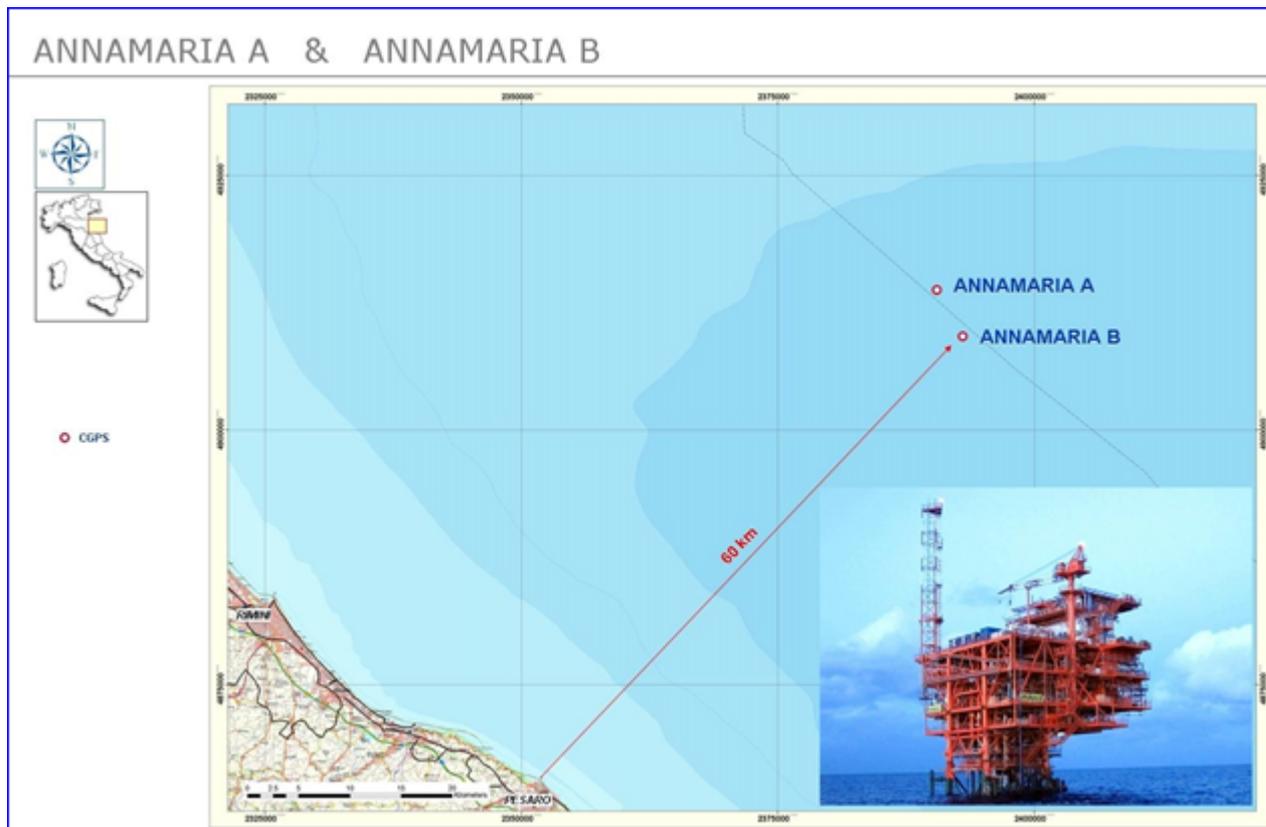


Figura 1 - Ubicazione del campo di Annamaria

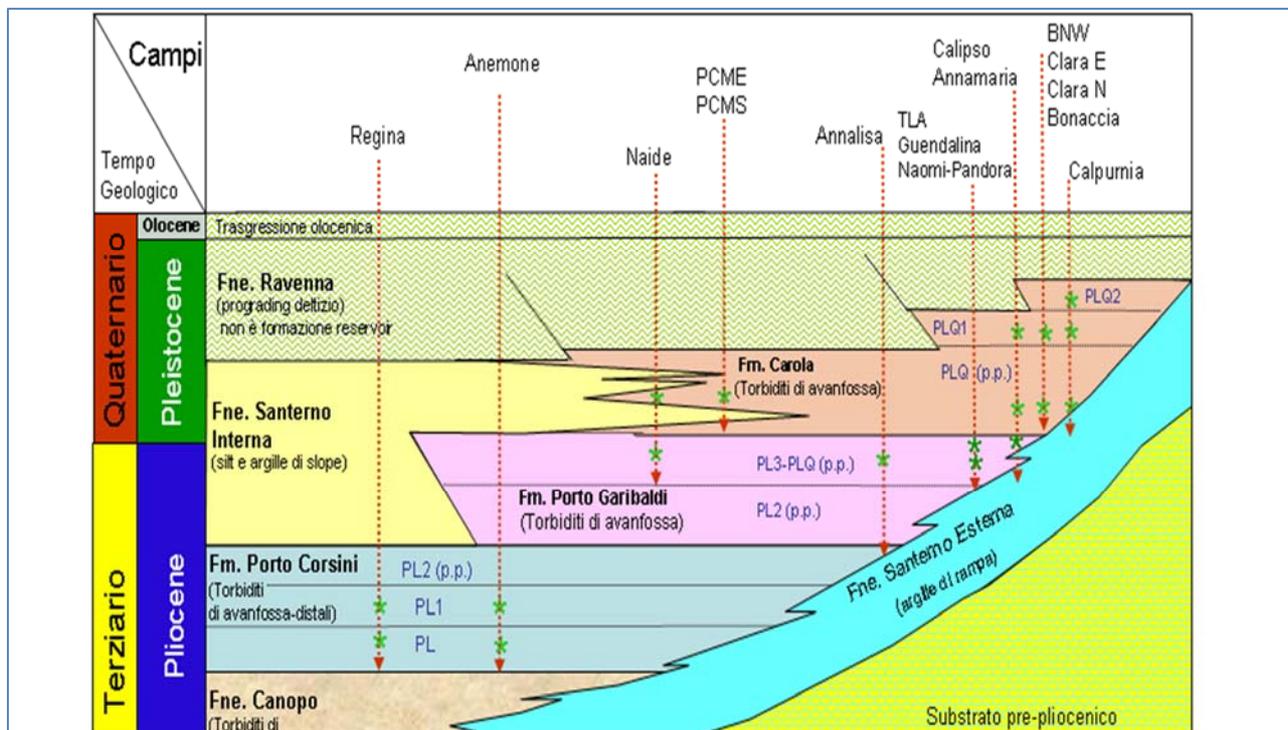


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici

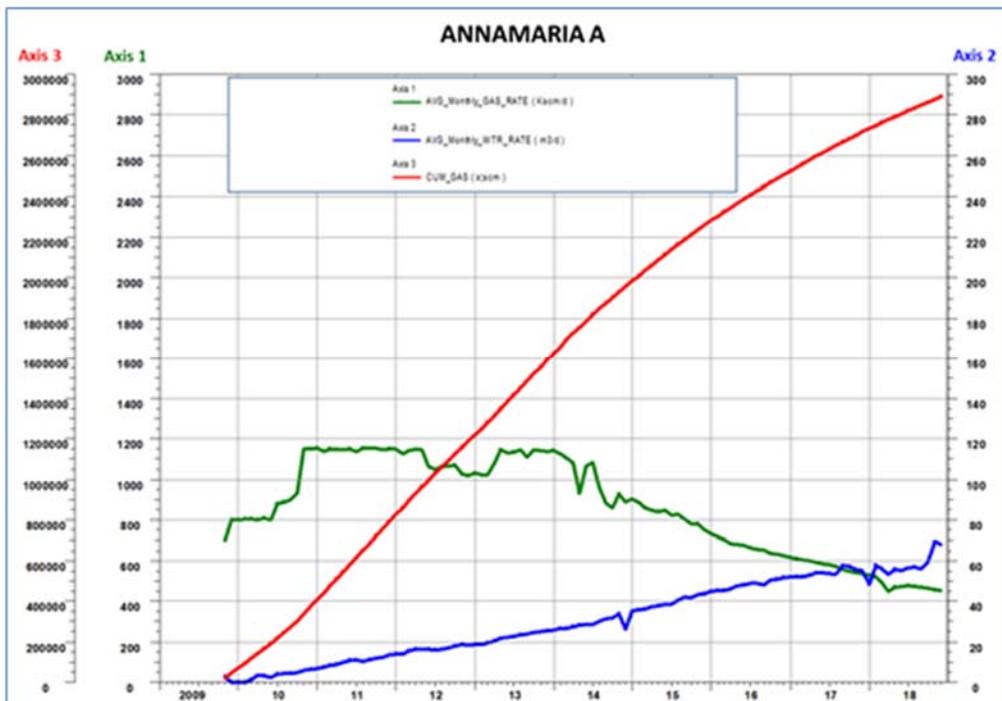


Figura 3 - Campo di Annamaria (Annamaria A): produzione storica

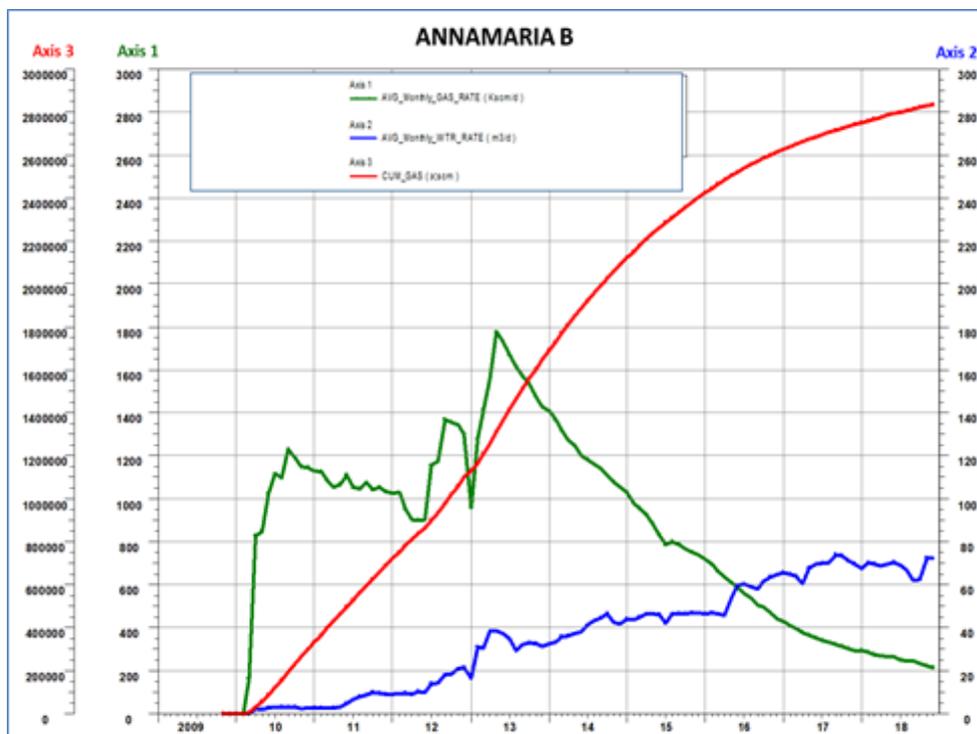


Figura 4 - Campo di Annamaria (Annamaria B): produzione storica

CAMPO DI ANNAMARIA					
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	
2009	46	46	46	46	1%
2010	626	626	671	671	9%
2011	811	811	1482	1482	20%
2012	808	808	2290	2290	30%
2013	951	951	3241	3241	43%
2014	808	808	4049	4049	54%
2015	613	613	4662	4662	62%
2016	457	457	5119	5119	68%
2017	340	355	5459	5474	73%
2018	268	292	5726	5766	76%
2019		246		6012	
2020		221		6233	
2021		198		6431	
2022		180		6611	
2023		166		6777	
2024		152		6929	
2025		139		7068	
2026		130		7198	
2027		111		7309	
2028		100		7409	
2029		69		7478	
2030		50		7528	

Figura 5 - Campo di Annamaria: tabella dati di produzione (annuale e cumulativa) vs. modello Eclipse 2017

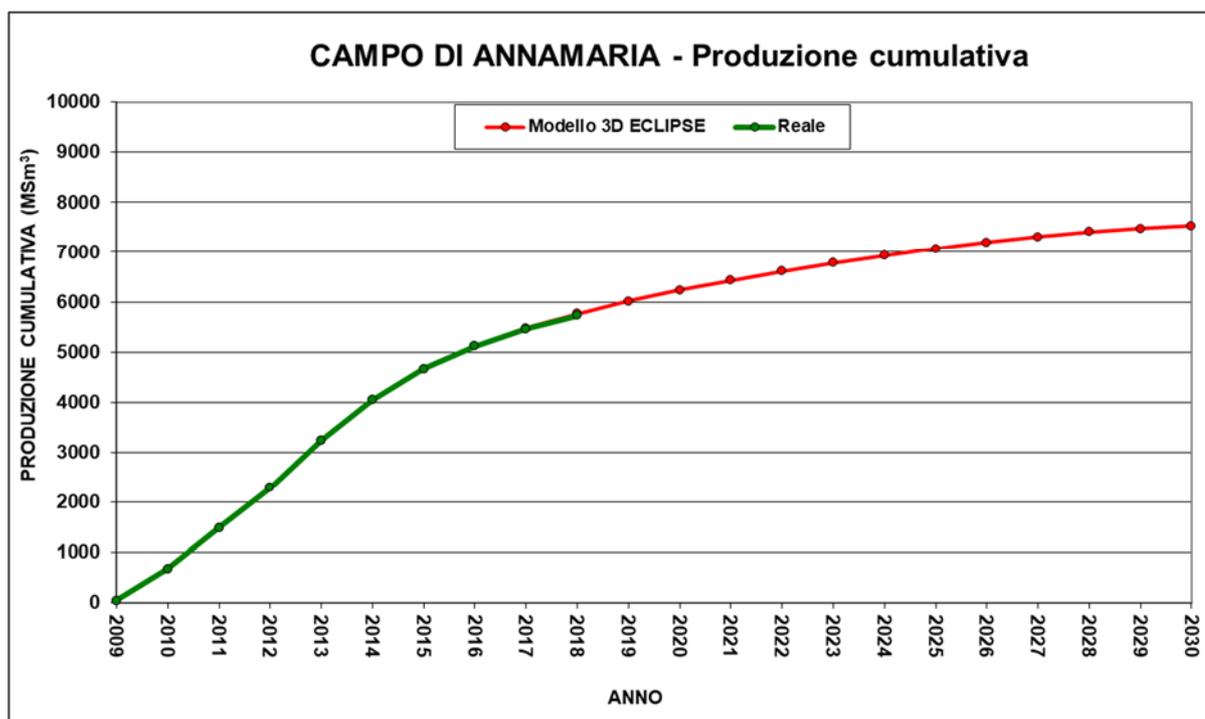


Figura 6 - Campo di Annamaria: grafico di produzione reale e da modello Eclipse 2017

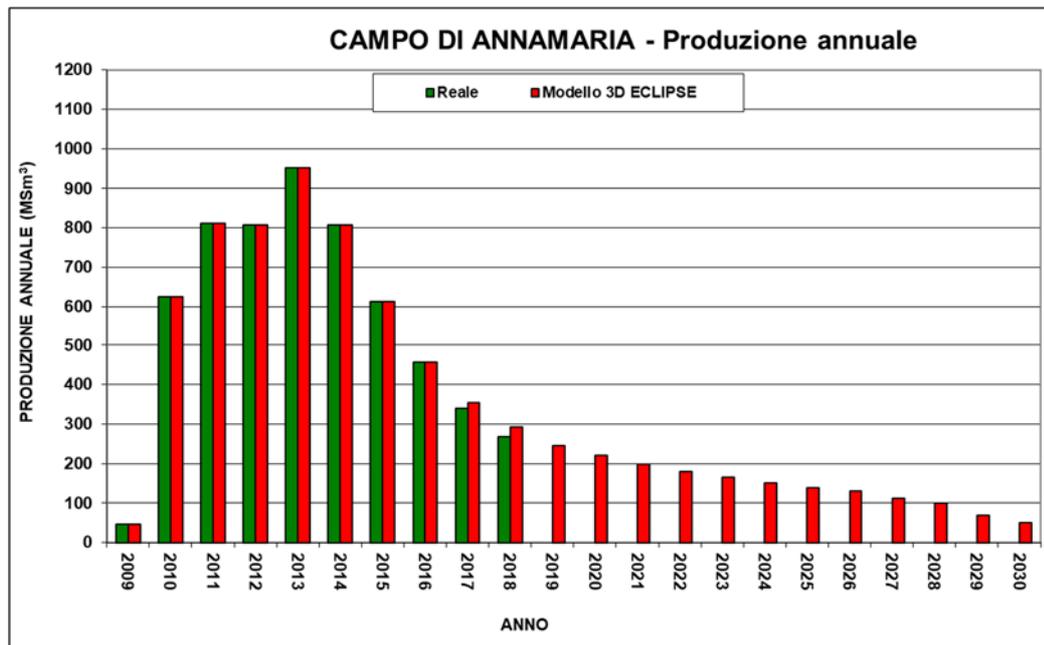


Figura 7 - Campo di Annamaria: produzione (annuale) reale e da modello Eclipse 2017

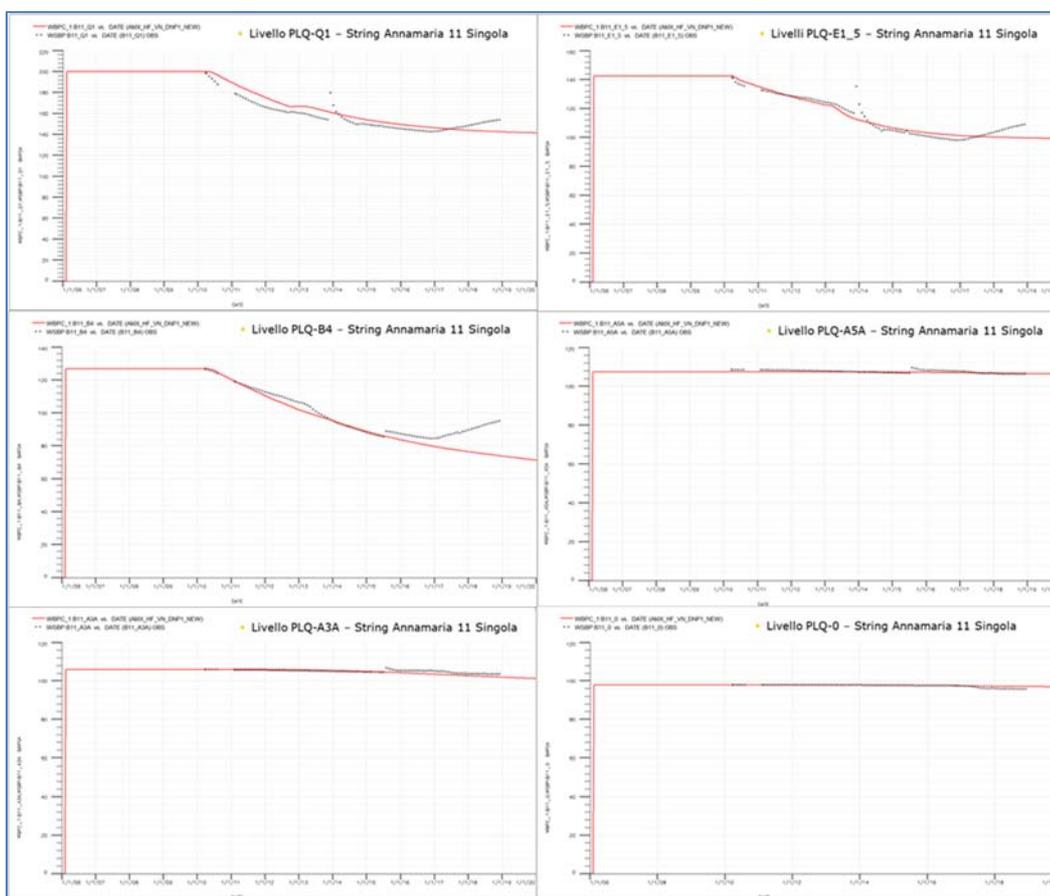


Figura 8 - Misure di pressione (Annamaria 11B PPG) e modello Eclipse 2017

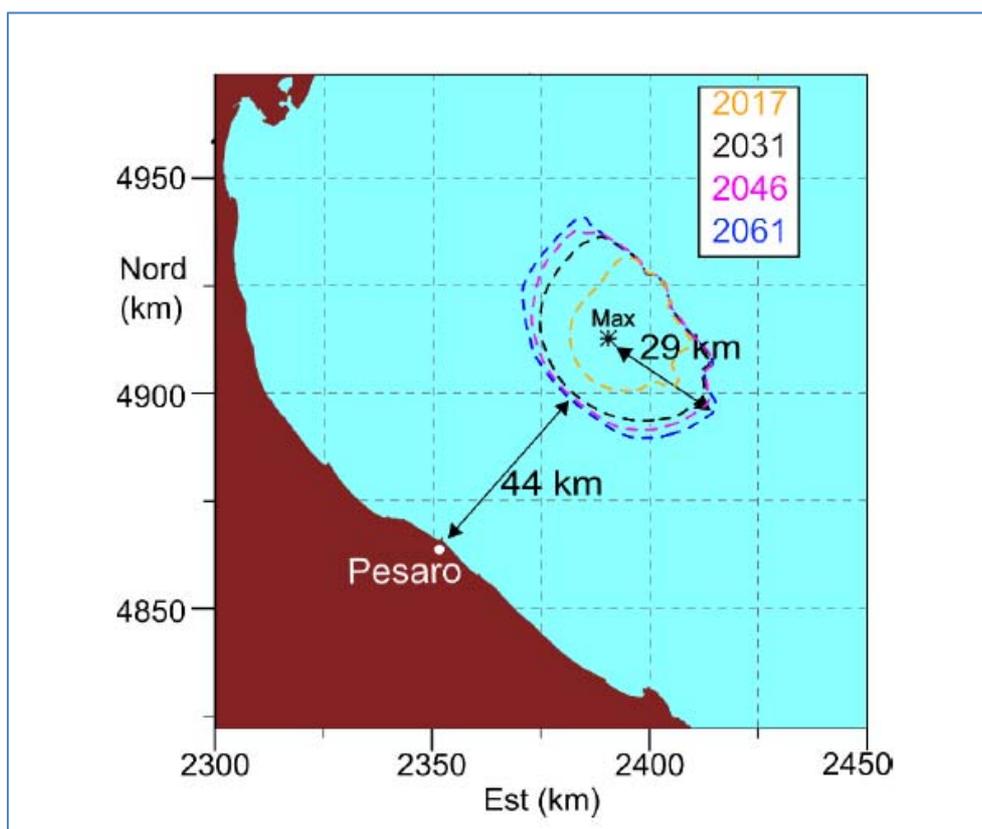
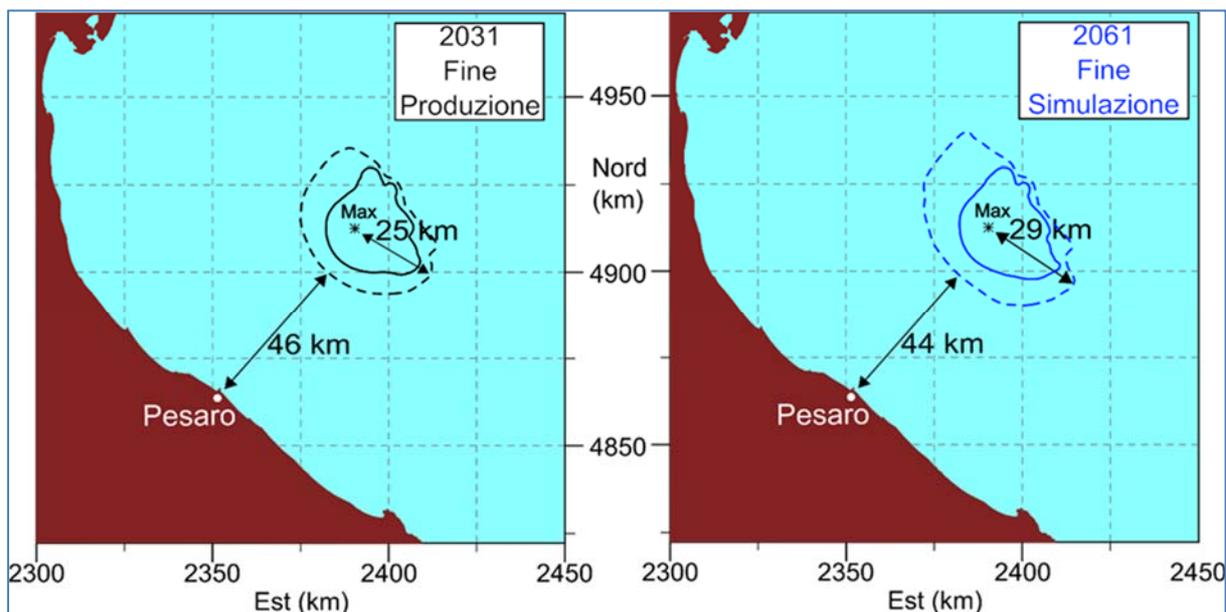


Figura 9 - Modello geomeccanico 2017. In alto: linee di iso-subsidenza dei 2 cm (linea tratteggiata) e 5 cm (linea continua) al termine della produzione (a sinistra) e a fine simulazione (a destra). Sotto: evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm. L'asterisco indica il punto di massimo.

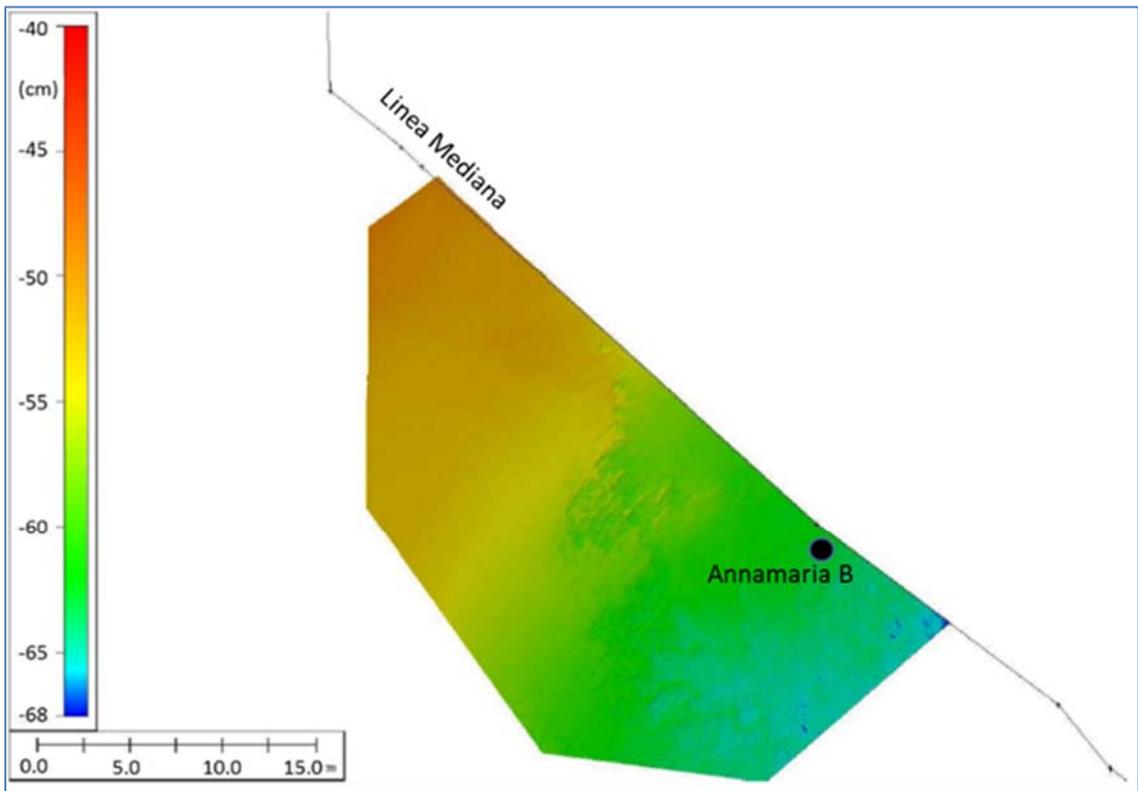


Figura 10 - Campo di Annamaria: area della batimetria 2016

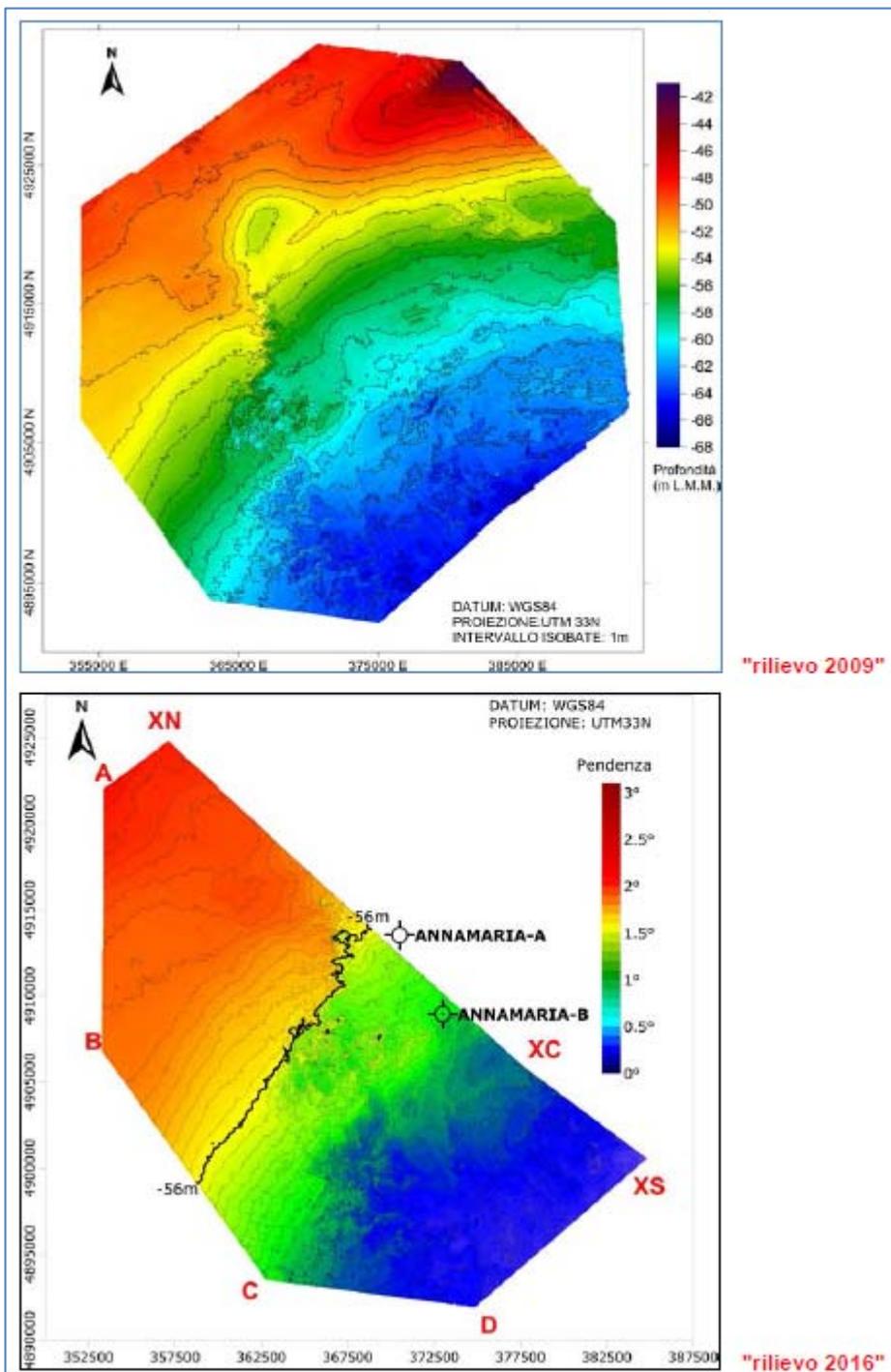


Figura 11 - Campo di Annamaria: modello digitale del fondale da rilievo batimetrico multibeam 2009 e 2016

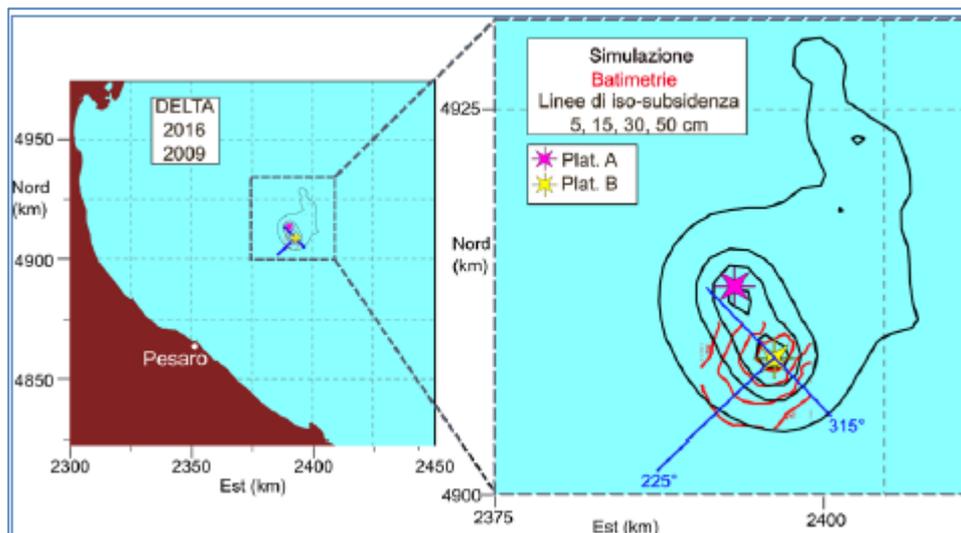


Figura 12 – Subsidenza sviluppata dal 2009 al 2016. Confronto tra misure batimetriche e stime del modello geomeccanico. Sono riportate anche le tracce delle sezioni utilizzate per i confronti della Figura 13

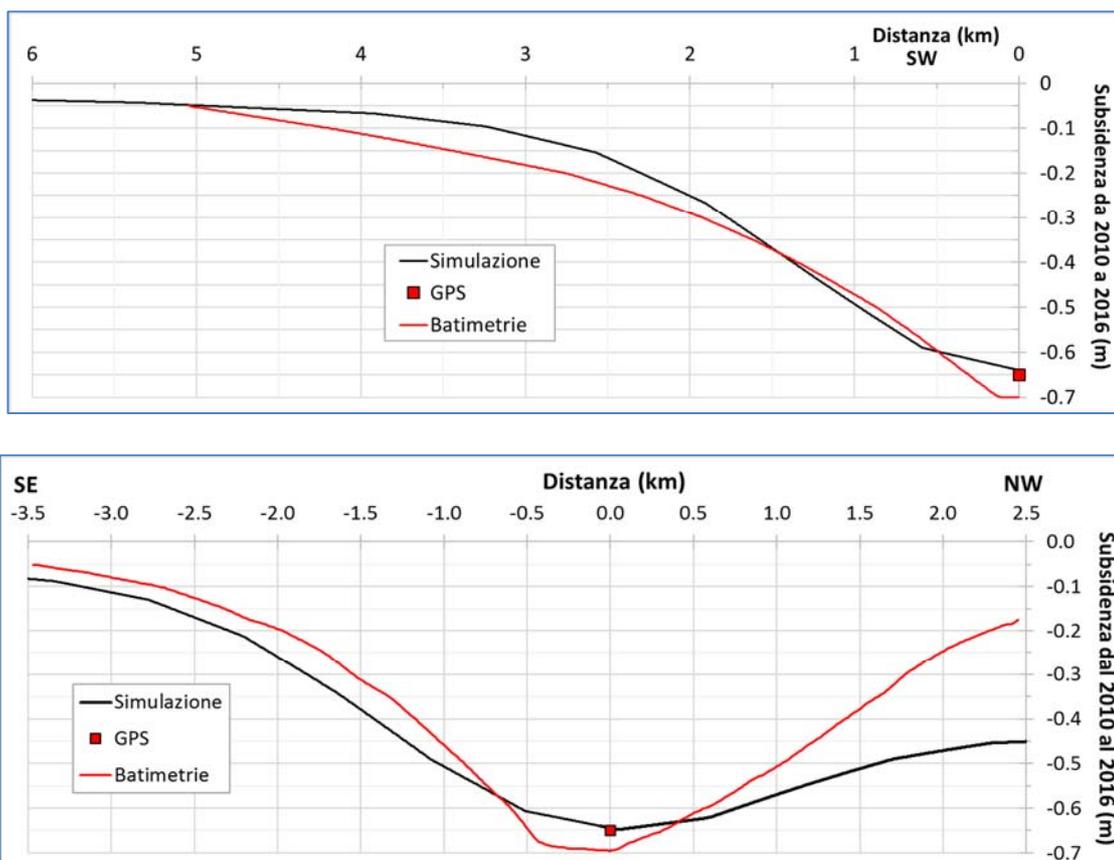


Figura 13 - Subsidenza sviluppata dal 2009 al 2016 lungo le sezioni aventi azimuth 225°(sopra) e 315° (sotto). Confronto tra valori stimati dal modello geomeccanico, misure batimetriche e CGPS

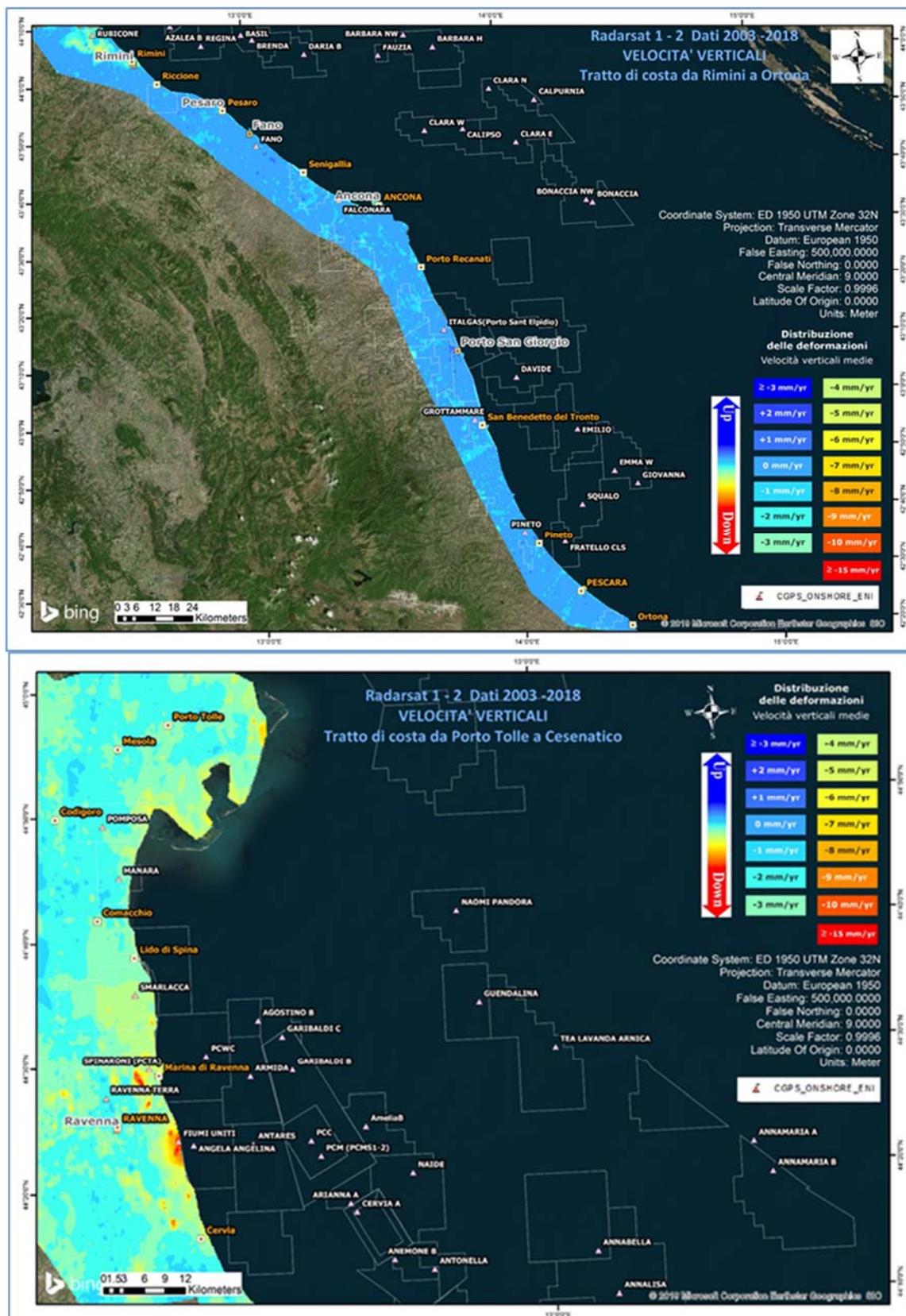


Figura 14 - campo di Annamaria: analisi dati SAR dal 2003 al 2018

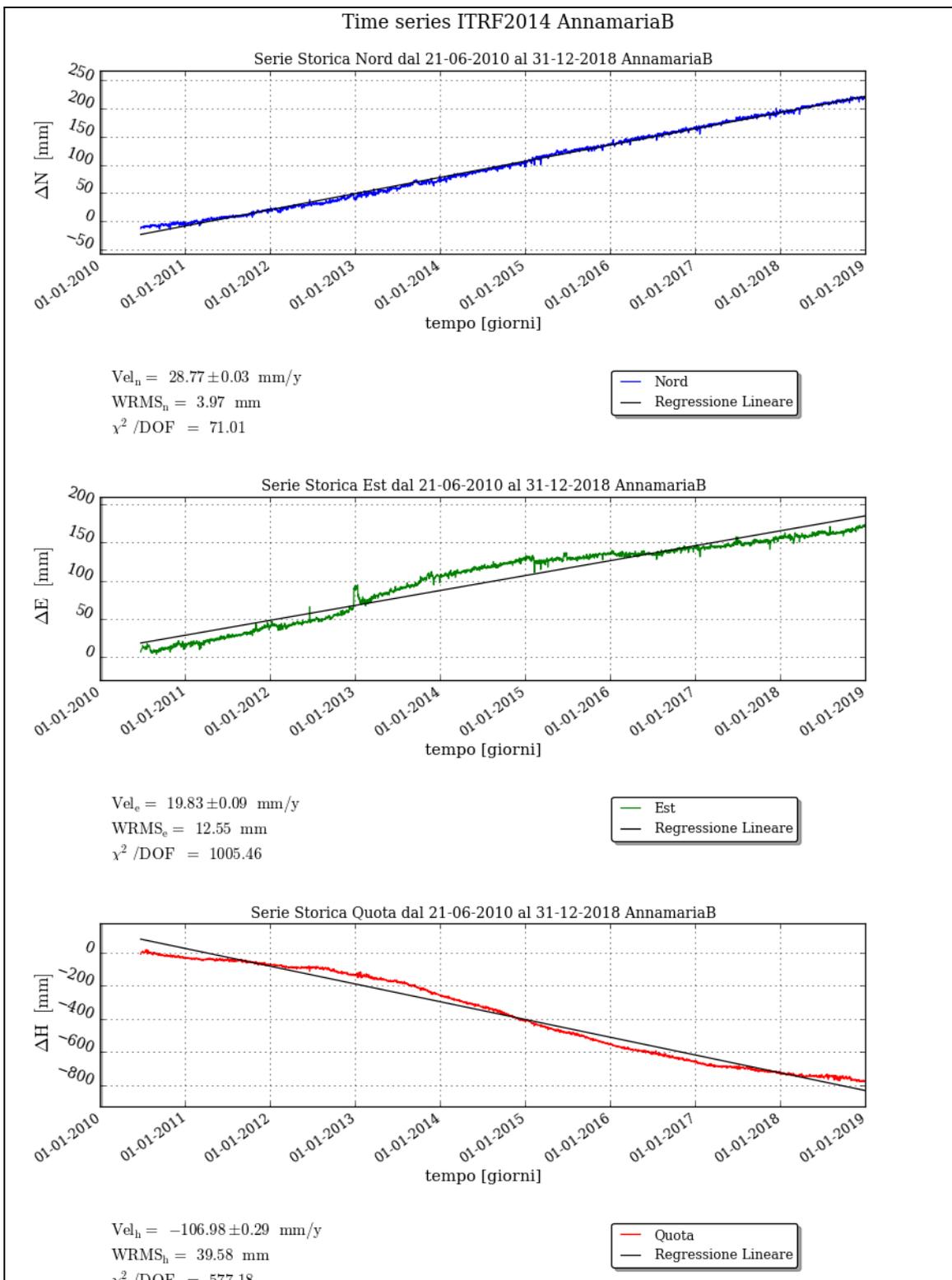


Figura 15 - Serie storiche di misure CGPS: piattaforma Annamaria B (acque italiane)

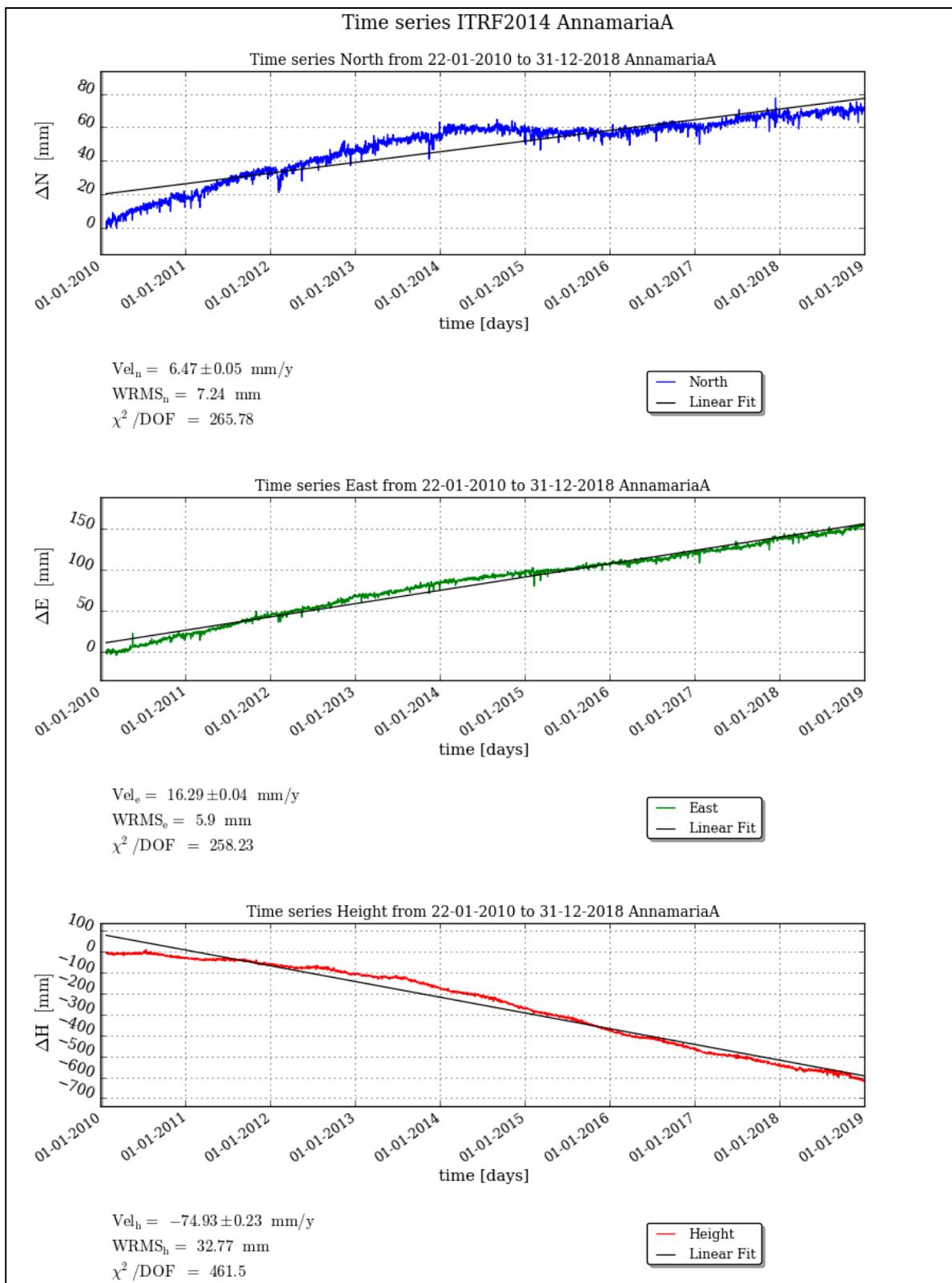
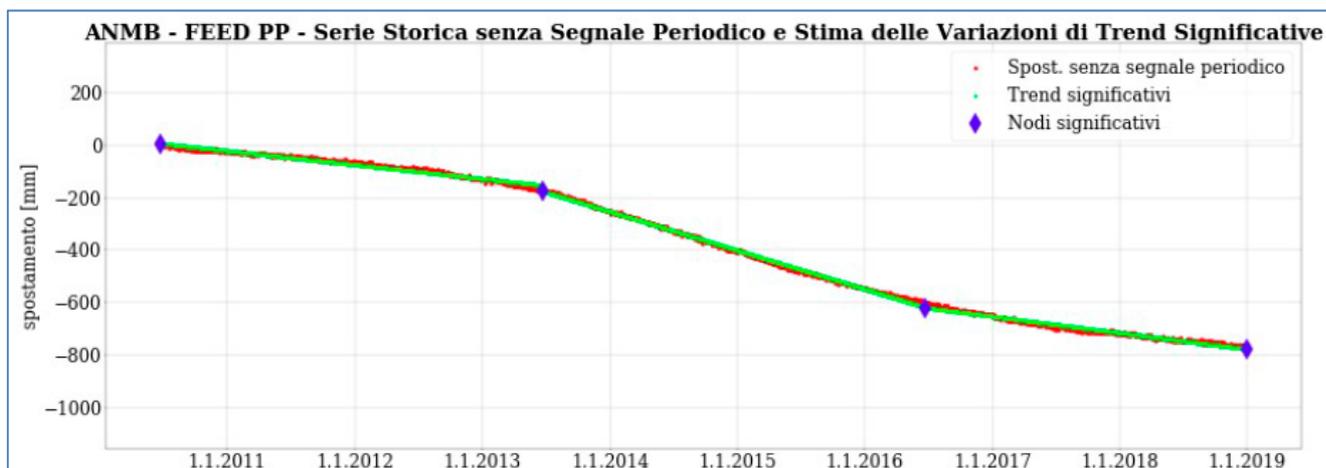


Figura 16 - Serie storiche di misure CGPS: piattaforma Annamaria A (acque croate)



FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo	velocità [mm/y]	sigma [mm/y]	
23/06/2010 - 22/06/2013	-59.31	0.25	
22/06/2013 - 21/06/2016	-152.53	0.20	
21/06/2016 - 31/12/2018	-61.54	0.31	

Figura 17 - Analisi della serie storica di misure CGPS (p.ma Annamaria B)

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

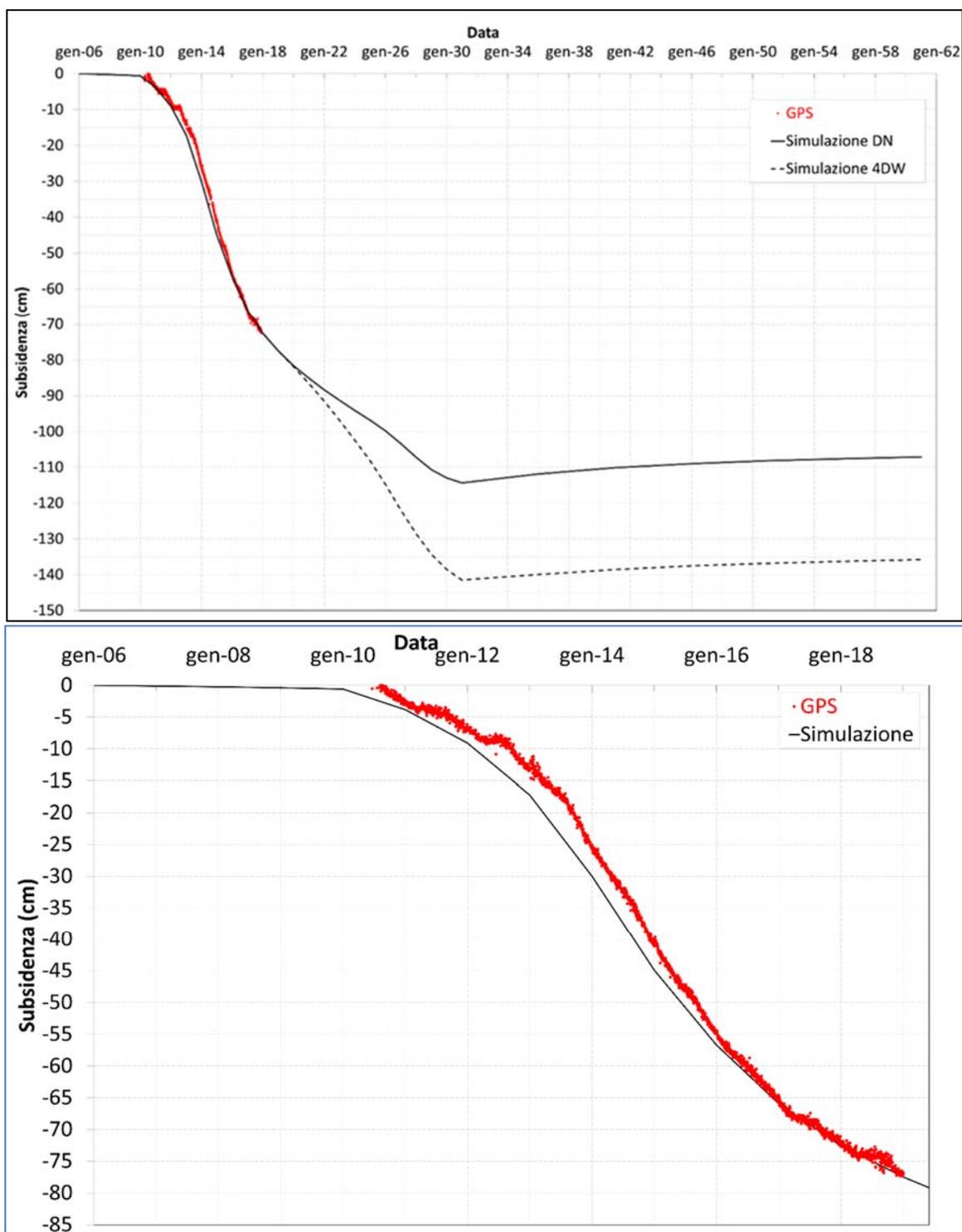


Figura 19 - Confronto fra la subsidenza totale misurata dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Annamaria B e i valori previsti dal modello geomeccanico del 2017



SPACING #	Measured Depth (m MD)		Compattazione (-) & Espansione (+) (mm)									
	Top Bullet	Bottom Bullet	set-10	mar-11	apr-12	lug-13	set-14	mag-15	lug-16	set-17	dic-18	
			mar-10	set-10	mar-11	apr-12	lug-13	lug-13	set-14	mag-15	lug-16	lug-16
99	970,00	980,50	2	1	2	1	2	-3	-25	-16	-3	
98	975,25	985,75	-1	0	0	1	1	-3	2	-2	3	
97	980,50	991,00	-5	3	-3	-2	4	-4	27	10	11	
96	985,75	996,25	0	-1	0	0	0	0	-22	-2	8	
95	991,00	1001,50	2	2	-3	-1	1	-1	-2	-1	2	
92	1057,55	1068,05	1	3	-2	0	2	-6	17	20	9	
91	1062,80	1073,30	3	-4	2	-2	-1	0	-15	21	9	
90	1068,05	1078,05	1	0	0	-3	4	-2	-3	-9	0	
89	1073,30	1083,80	-3	4	4	-11	5	0	19	-6	5	
88	1078,05	1089,05	2	4	-6	-1	1	-3	-32	-21	10	
87	1083,80	1094,30	1	-1	-5	7	0	-4	3	-17	6	
86	1089,05	1099,55	2	-1	1	7	-14	0	24	25	9	
85	1094,30	1104,80	2	0	2	-4	3	-4	-32	6	9	
84	1099,55	1110,05	2	1	1	0	0	-4	14	-33	-7	
83	1104,80	1115,30	-3	-1	1	-1	2	1	-3	-7	4	
82	1110,05	1120,55	-1	1	4	0	-3	0	4	-3	17	
81	1115,30	1125,80	4	-4	3	-3	1	-3	3	-7	9	
80	1120,55	1131,05	-1	-6	6	-2	5	-1	-4	-7	4	
79	1125,80	1136,30	-2	-2	3	-3	-4	1	6	-8	5	
78	1131,05	1141,55	2	1	1	-4	-2	0	-2	-2	8	
77	1136,30	1146,80	4	1	-4	-2	12	0	-24	-10	7	
76	1141,55	1152,05	-4	2	-2	1	2	-1	-3	-2	8	
75	1146,80	1157,30	-1	-3	3	-3	-4	1	10	2	5	
74	1152,05	1162,55	1	1	-3	-2	5	-5	-8	-4	4	
73	1157,30	1167,80	1	-1	1	-2	-3	-6	-27	-4	-2	
72	1162,55	1173,05	2	-5	5	-4	-4	-2	-2	-4	4	
71	1167,80	1178,30	0	2	-3	-6	-3	-8	17	-7	5	
70	1173,05	1183,55	-6	3	-2	-13	-15	-19	-17	-10	-2	
69	1178,30	1188,80	-2	0	0	-9	-46	-26	-27	-11	6	
68	1183,55	1194,05	2	-2	0	-14	-46	-18	-24	-13	9	
67	1188,80	1199,30	-4	1	-2	-14	-18	-13	-24	-19	0	
66	1194,05	1204,55	2	-1	-2	-5	-11	-13	-19	-23	1	
65	1199,30	1209,80	-1	0	-3	-1	-4	-4	0	-17	-2	
64	1204,55	1215,05	3	0	-2	-3	5	-2	-5	-2	3	
63	1209,80	1220,30	-3	2	1	0	-5	-3	-12	4	12	
62	1215,05	1225,55	1	-3	1	0	2	-3	-4	-2	3	
61	1220,30	1230,80	0	-2	2	-2	2	1	-5	-6	7	
60	1225,55	1236,05	-1	0	-2	3	-5	-2	-2	3	-2	
59	1230,80	1241,30	2	-3	2	-1	0	-5	-5	-3	2	
58	1236,05	1246,55	1	0	-2	-5	-5	2	-9	-7	-2	
57	1241,30	1251,80	-3	2	-1	1	-3	-3	-7	-8	1	
56	1246,55	1257,05	1	3	0	-14	-1	-3	7	-18	-5	
55	1251,80	1262,30	-2	2	3	-9	-12	-2	-8	-8	-3	
54	1257,05	1267,55	-4	4	0	-7	-14	-13	-14	9	15	
53	1262,30	1272,80	-2	-1	-5	-4	-12	-8	-10	-15	-4	
52	1267,55	1278,05	1	-1	-4	-10	-15	-12	-14	-12	-5	
51	1272,80	1283,30	-4	-2	2	-12	-22	-15	-14	-16	-4	
50	1278,05	1288,55	-4	-2	-4	-6	-18	-9	-22	-14	-4	
49	1283,30	1293,80	-1	-2	-3	-3	-10	-10	2	-10	3	
48	1288,55	1299,05	2	-1	0	-2	0	-3	-2	-4	4	
47	1293,80	1304,30	2	1	0	-4	0	0	-1	-8	8	
46	1299,05	1309,55	0	-1	0	-3	4	-1	-7	-6	7	

Figura 20 - Misure di compattazione in-situ (da FSMT) da spacing # 46 a spacing # 99



SPACING #	Measured Depth (m MD)		Compattazione (-) & Espansione (+) (mm)									
	Top Bullet	Bottom Bullet	mar-10	set-10	mar-11	apr-12	lug-13	set-14	mag-15	lug-16	set-17	dic-18
			mar-10	mar-10	set-10	mar-11	apr-12	lug-13	set-14	mag-15	lug-16	set-17
45	1304,30	1314,80	0	2	0	1	0	-4	-1	-6	-3	3
44	1309,55	1320,05	0	-1	-2	2	-9	-5	-6	6	-5	5
43	1314,80	1325,30	0	-3	-2	-6	-6	-3	-4	-6	-4	5
42	1320,05	1330,55	0	0	-1	-5	-4	-2	-1	-12	-7	3
41	1325,30	1335,80	0	-1	-2	-3	-7	-6	-3	-2	-7	6
40	1330,55	1341,05	0	-1	-2	-3	-8	-5	-7	3	-8	4
39	1335,80	1346,30	0	2	-1	-2	-1	1	-4	-12	-3	2
38	1341,05	1351,55	0	-1	0	1	-1	-6	-1	-3	-3	3
37	1346,30	1356,80	0	0	-2	-1	-2	-5	-2	-3	-6	6
36	1351,55	1362,05	0	-1	-1	-1	-7	-4	-2	-4	-6	4
35	1356,80	1367,30	0	-3	1	0	-10	-2	-4	-2	-2	-4
34	1362,05	1372,55	0	0	-2	1	-4	-4	-5	-3	-5	4
33	1367,30	1377,80	0	-1	0	0	-3	-3	-4	-1	-8	8
32	1372,55	1383,05	0	-4	1	-1	-2	-8	-2	-5	-5	6
31	1377,80	1388,30	0	-4	-2	2	-9	-5	-5	-3	-3	3
30	1383,05	1393,55	0	-3	-2	-3	-2	-7	-4	-4	-5	7
29	1388,30	1398,80	0	0	-2	-1	-6	-5	-5	1	-8	6
28	1393,55	1404,05	0	0	-3	1	-6	-7	-5	-1	-2	4
27	1398,80	1409,30	0	0	0	0	-4	-3	-4	-3	-4	5
26	1404,05	1414,55	0	1	1	0	-1	-2	-3	0	-5	3
25	1409,30	1419,80	0	2	-1	1	-5	-5	-2	-2	-4	4
24	1414,55	1425,05	0	0	0	0	-13	-4	-3	-1	-4	6
23	1419,80	1430,30	0	1	-2	-1	-11	0	0	0	-5	7
22	1425,05	1435,55	0	0	-1	2	-7	-2	-1	-1	-6	7
21	1430,30	1440,80	0	0	-2	4	-5	-3	-4	-1	-5	8
20	1435,55	1446,05	0	2	-2	1	-4	1	-2	-3	-3	6
19	1440,80	1451,30	0	1	-2	3	-3	-1	-3	-2	-2	3
18	1446,05	1456,55	0	1	0	-1	1	3	-4	-2	0	3
17	1451,30	1461,80	0	1	1	2	-4	2	-1	-2	-4	6
16	1456,55	1467,05	0	0	1	-2	0	-1	-2	-1	-3	4
15	1461,80	1472,30	0	-1	1	2	-3	0	0	0	-3	8
14	1467,05	1477,55	0	-1	2	1	-3	2	-6	0	-3	6
13	1472,30	1482,80	0	-1	0	0	1	-1	-3	-1	-6	5
12	1477,55	1488,05	0	1	1	1	-2	4	0	-3	-1	1
11	1482,80	1493,30	0	2	-4	2	0	0	-1	-1	-2	4
10	1488,05	1498,55	0	2	-1	3	-2	-2	-1	-2	-5	6
7	1738,00	1748,50	0	-2	-2	2	-3	-3	-5	1	-4	-1
6	1743,25	1753,75	0	-4	-1	-5	-11	6	-1	-12	0	-2
5	1748,50	1759,00	0	-2	-2	-4	-5	-6	-2	-5	-1	0
4	1753,75	1764,25	0	-3	-1	-8	-7	-5	-3	1	-7	1
3	1759,00	1769,50	0	5	-1	-3	-9	-6	-3	-1	-8	-1
2	1764,25	1774,75	0	4	-4	0	-	-	-	-	-	-
Totale senza 2, 96, 97, 98 e 99				-9	-23	-15	-182	-176	-181	-188	-233	173

Figura 21 - Misure di compattazione in-situ (da FSMT) da spacing # 2 a spacing # 45

campo ANNAMARIA - ANNAMARIA B (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA: GAB-DEC-2008-0000271 del 12.12.2008 poi modificato alla lett. C con GAB-DEC-2009-0000093 del 31.07.2009	
UBICAZIONE		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (ANNAMARIA)	
PROFONDITA' FONDALE		SIA	
offshore - 60 km dalla costa marchigiana 55-65 m		ULTIMO AGGIORNAMENTO	
LITOLOGIA		STUDIO DI GIACIMENTO	
silt sabbie fini in livelli sottili		MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "APRILE '06"	
Ravenna - Carla P.LO2 - P.LO1 - P.LQ		RISERVE (MSm ³)	
570 - 1015 (FVDS)		8793 (Annamaria B) - 18130 (campo)	
fissa - standard torbiditi sottili		MOD. GEOMECCANICO	
		ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ GIUGNO 2007	
		MAX SUBS AL CENTRO (cm)	
		90 (@2038) SCENARIO DI RIFERIMENTO	
		MAX DIST. DAL CULMINE (km)	
		15 (@ 2060)	
		29 @ 2061 a circa 44 km dalla costa	
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI			
CONCESSIONE		LIVELLAZIONI	
A.C11.AG	D.M @dic '08 @ 31 dic 2018	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.	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	23/10/2019	I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM	
N. POZZI		IL PROSSIMO RILIEVO DI ENTRAMBI LE RETI DI LIVELLAZIONE (DORSALE ADRIATICA E PESARO-PORTO S.GIORGIO) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
Annamaria A	12	MARKERS	
Annamaria B	14		
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³)	18130	MARKERS SU ANNAMARIA B11: ULTIMO SURVEY @ dicembre 2018	
Annamaria A	9337	Survey eseguiti : marzo 2010 (rilievo base), settembre 2010, marzo 2011, aprile 2012, luglio 2013, settembre 2014, maggio 2015, luglio 2016 e settembre 2017	
Annamaria B	8793	CGPS	
START UP PRODUZIONE (Annamaria B) (Annamaria A)	mar-10 mar-09		
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2038	NEL GENNAIO DEL 2010 E' STATO INSTALLATO UN CGPS IN PIATTAFORMA. NEL 2008 E' STATO INSTALLATO CGPS NELLA CENTRALE ENI DI FANO (ONSHORE) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA	
GAS PRODOTTO (campo) (MSm ³)	5726	SAR	
Annamaria A	2891		
Annamaria B	2835	ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ ottobre 2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.M.A ANNAMARIA B NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA. ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
% RISERVE PRODOTTE (campo)	76%	BATIMETRIE	
		Rilievo batimetrico di controllo effettuato tra giugno-luglio 2016	
		Rilievo batimetrico "base" effettuato tra aprile-giugno 2009 (area italiana) e ottobre-dicembre 2009 (area croata)	

Figura 22 - Campo di Annamaria: scheda di sintesi

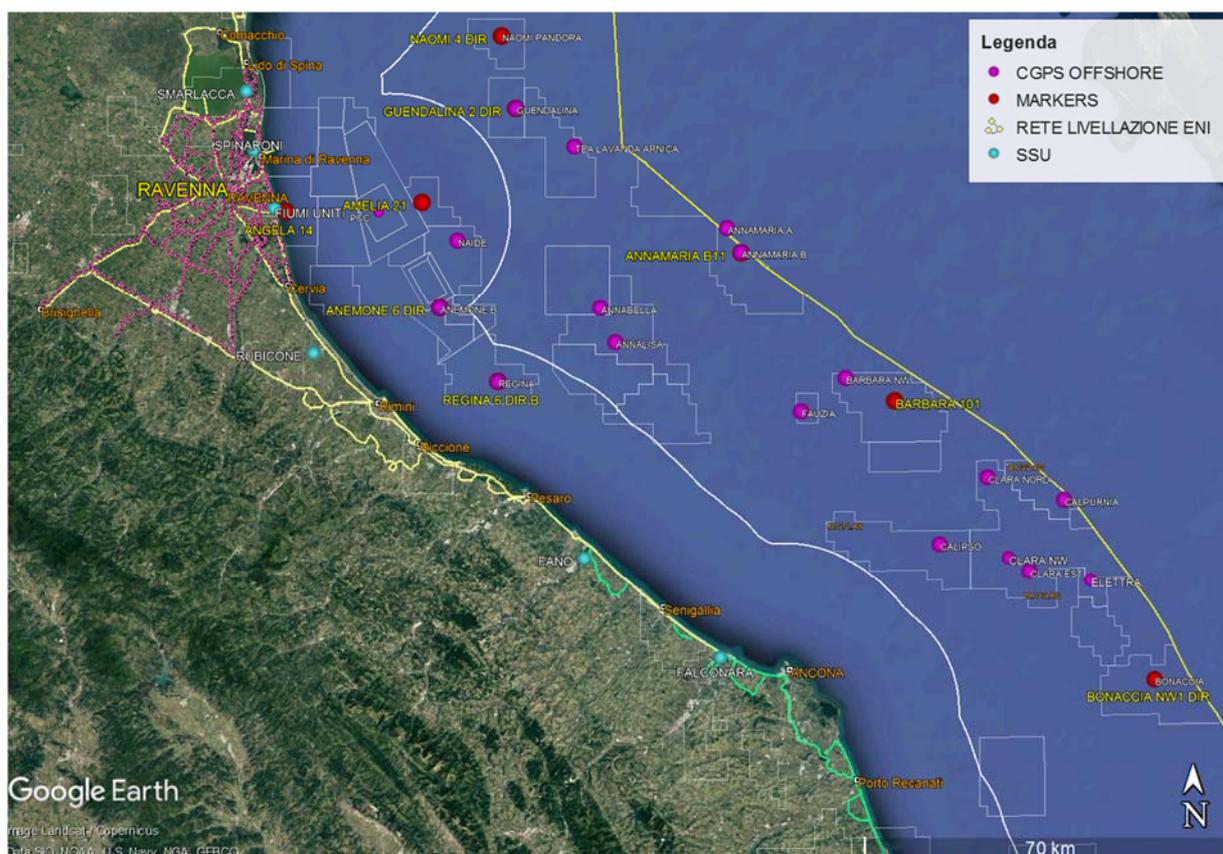


Figura 23 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

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-AN- CONA	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

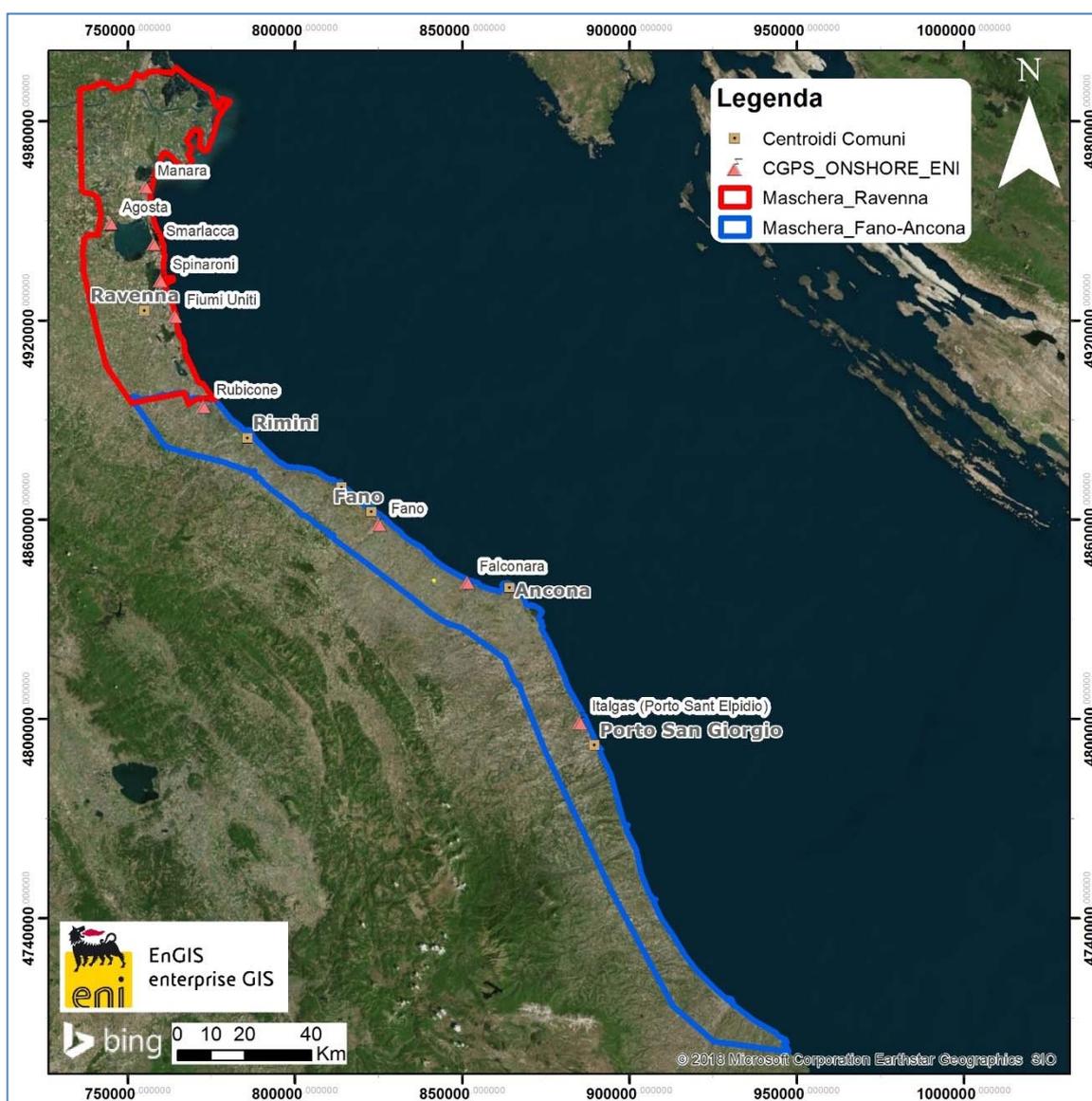


Fig. 1 – Mappa mosaicatura dati InSAR

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.

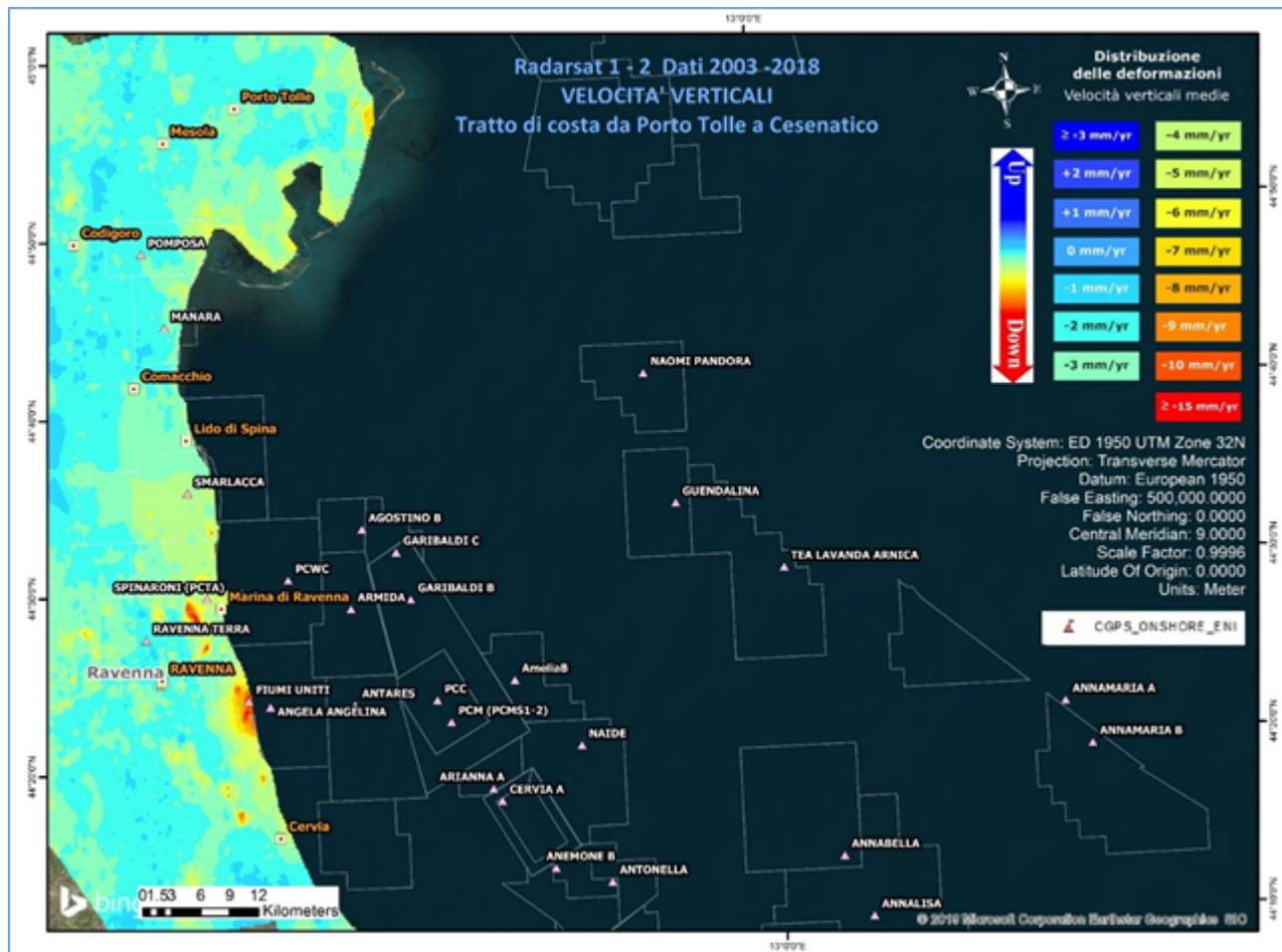


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

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®.

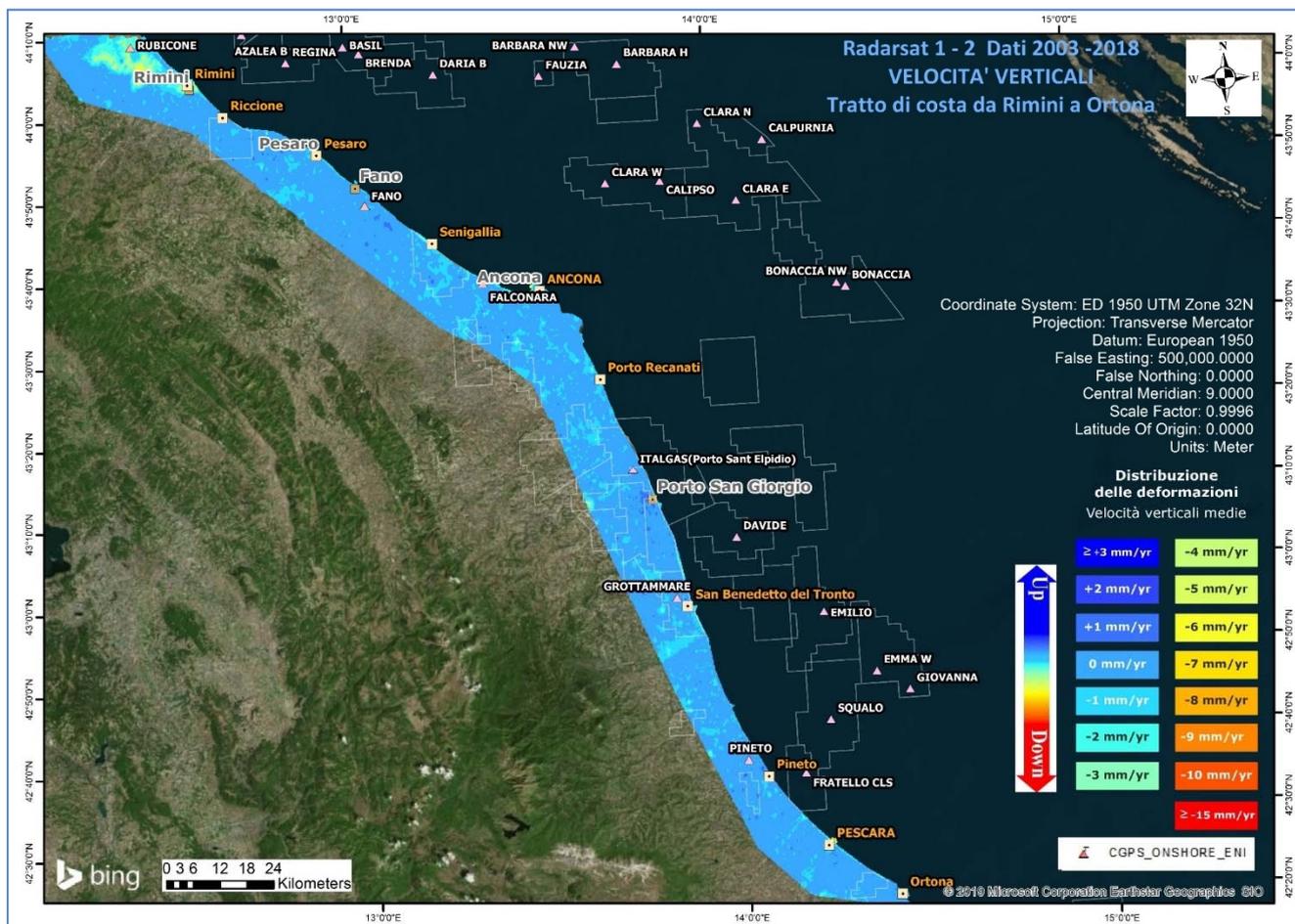


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

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.

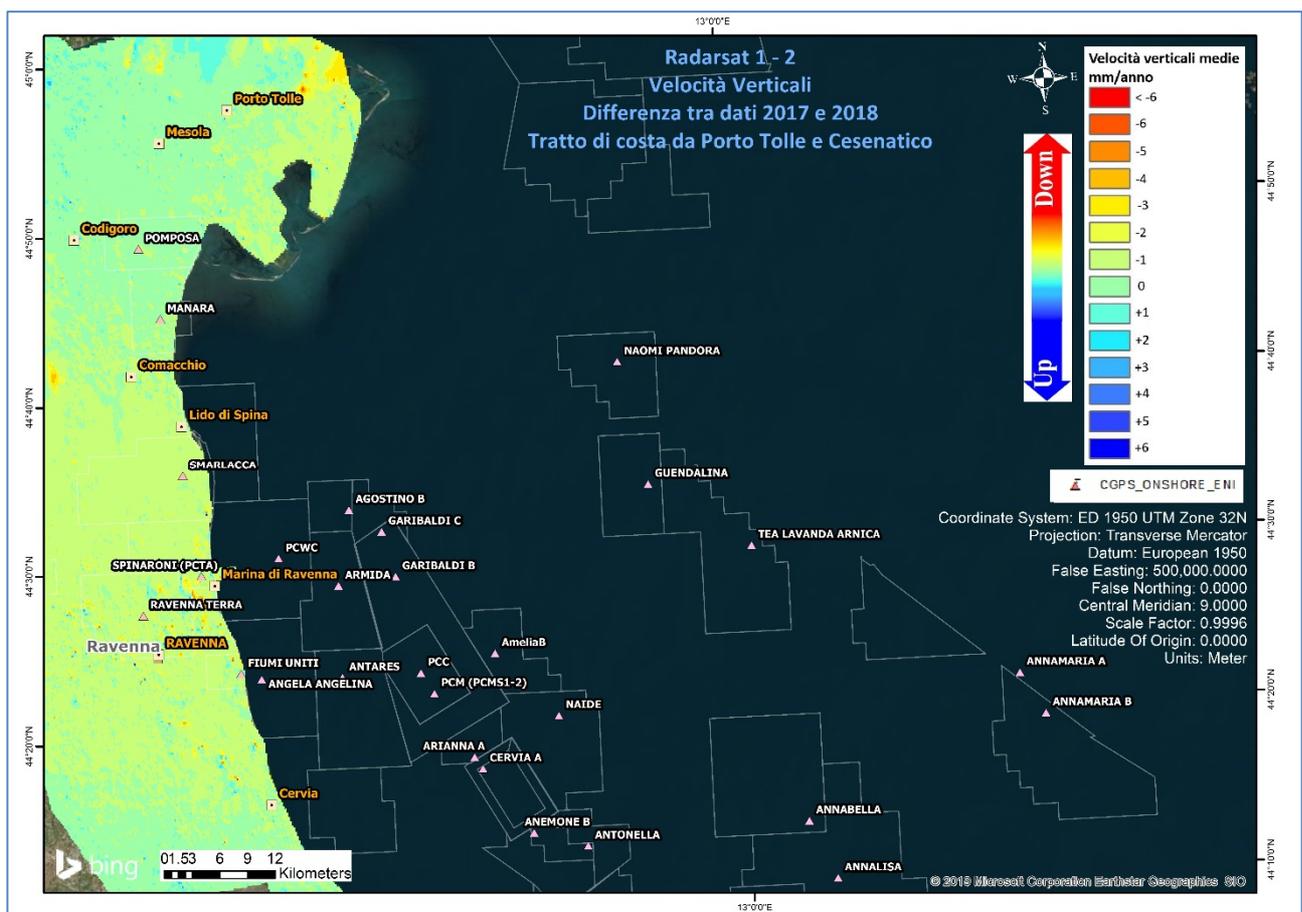


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

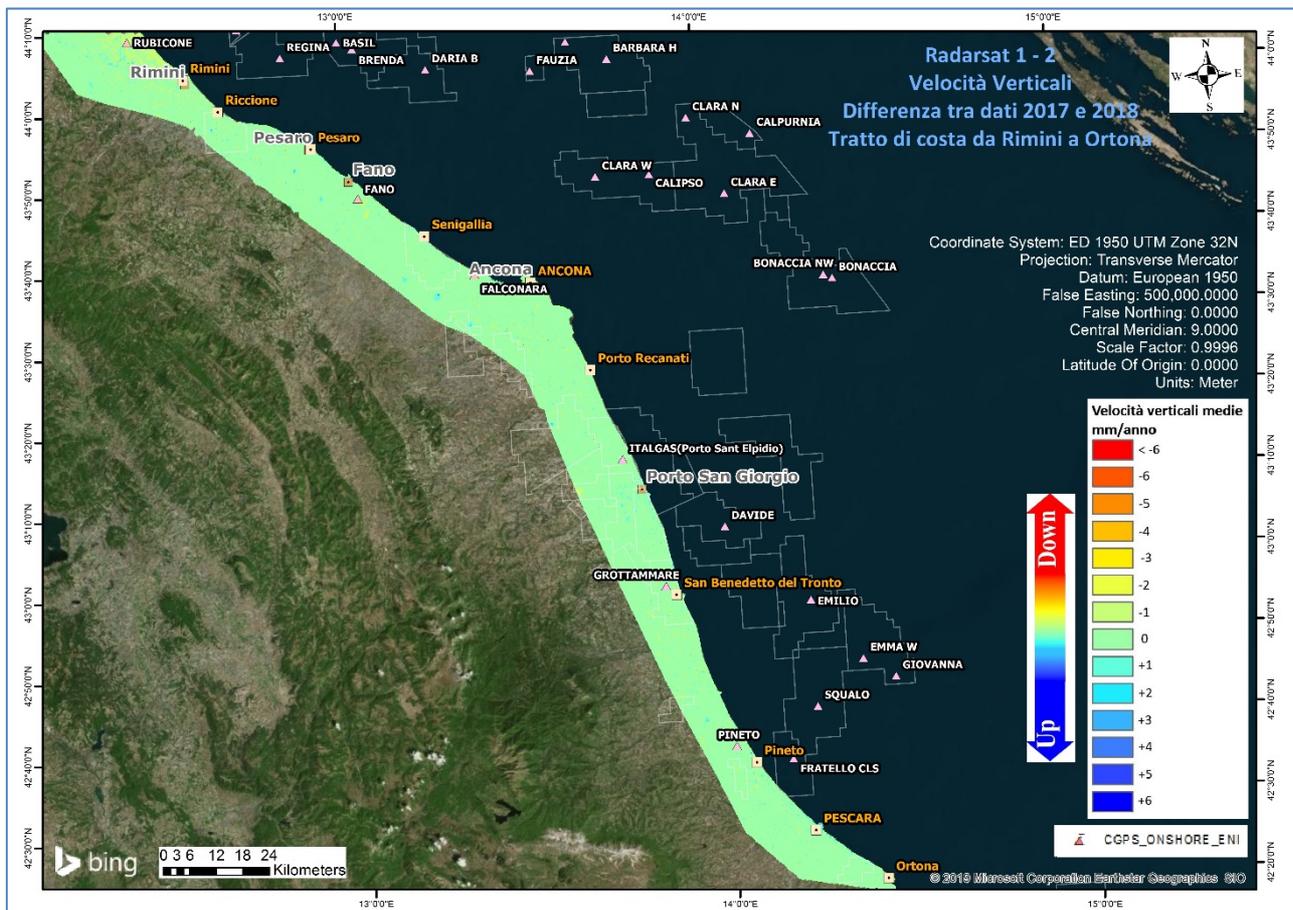


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

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.

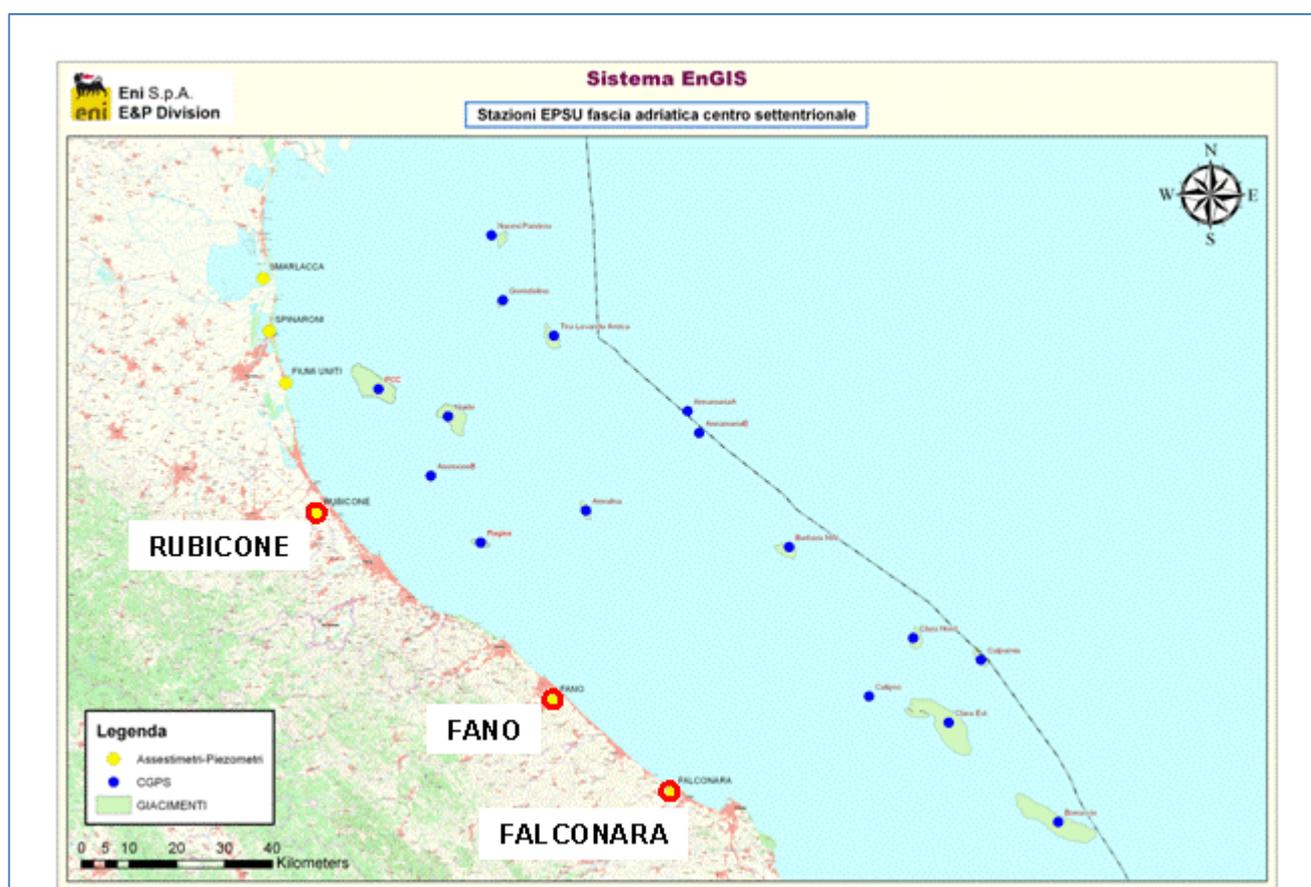


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

In generale una stazione *EPSU* è costituita da un assestmetro, 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 assestmetriche per le variazioni della temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in Figura 2B.

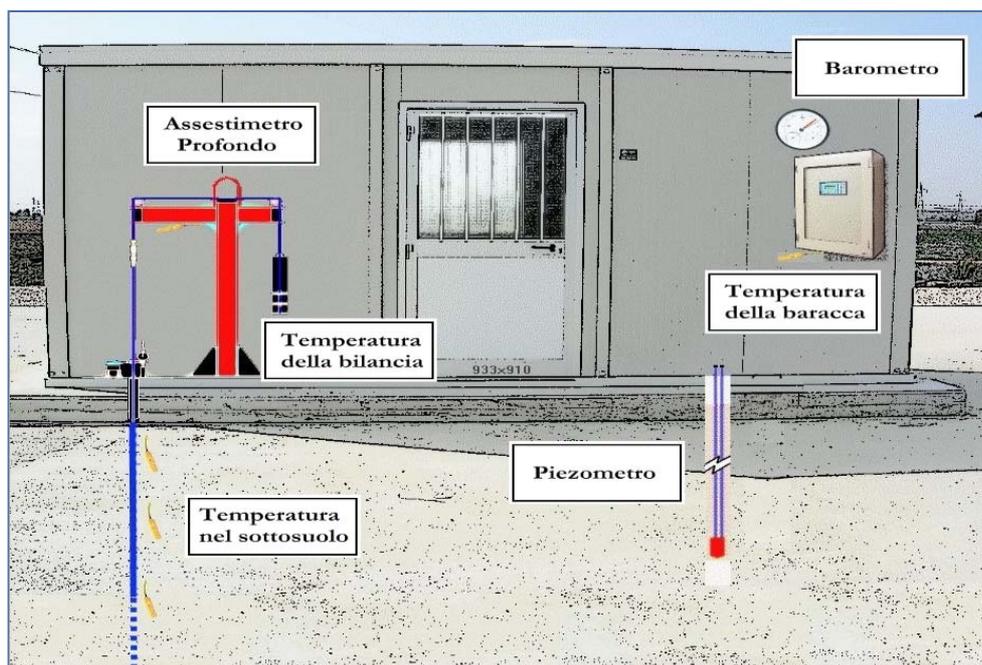


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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÷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.

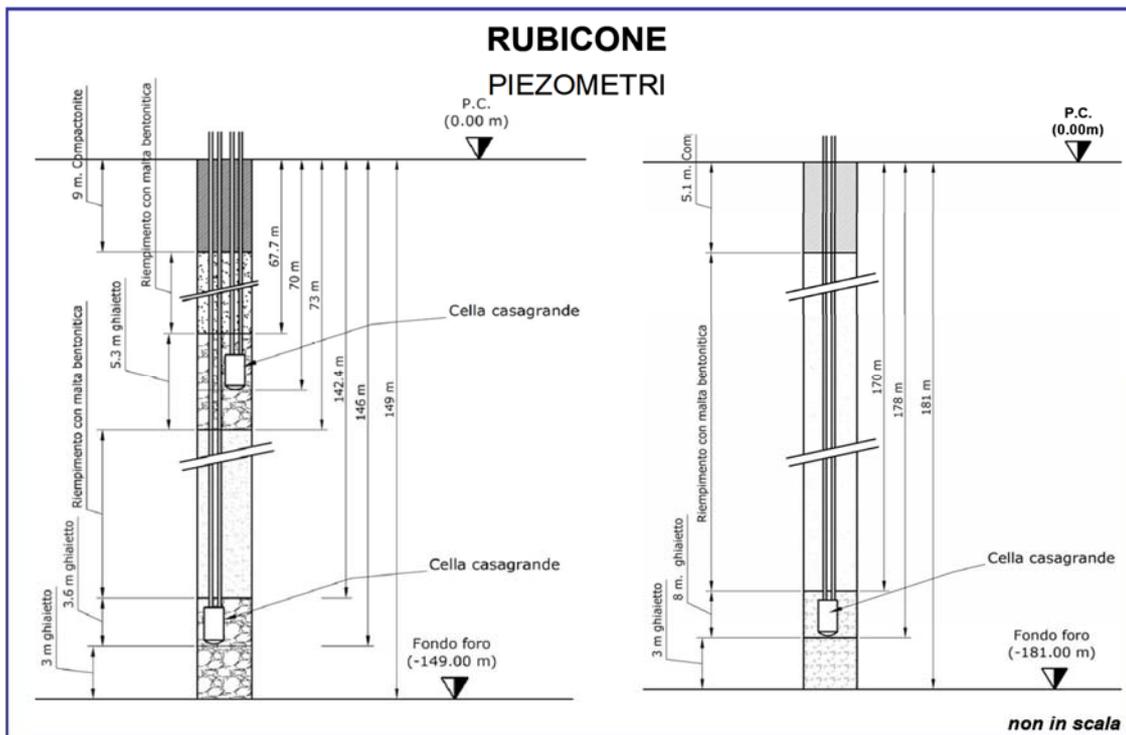


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

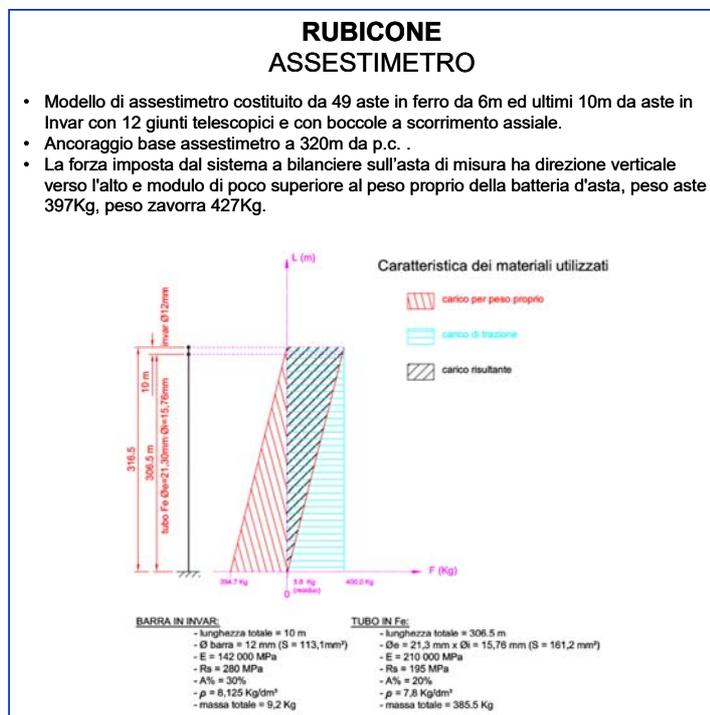


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

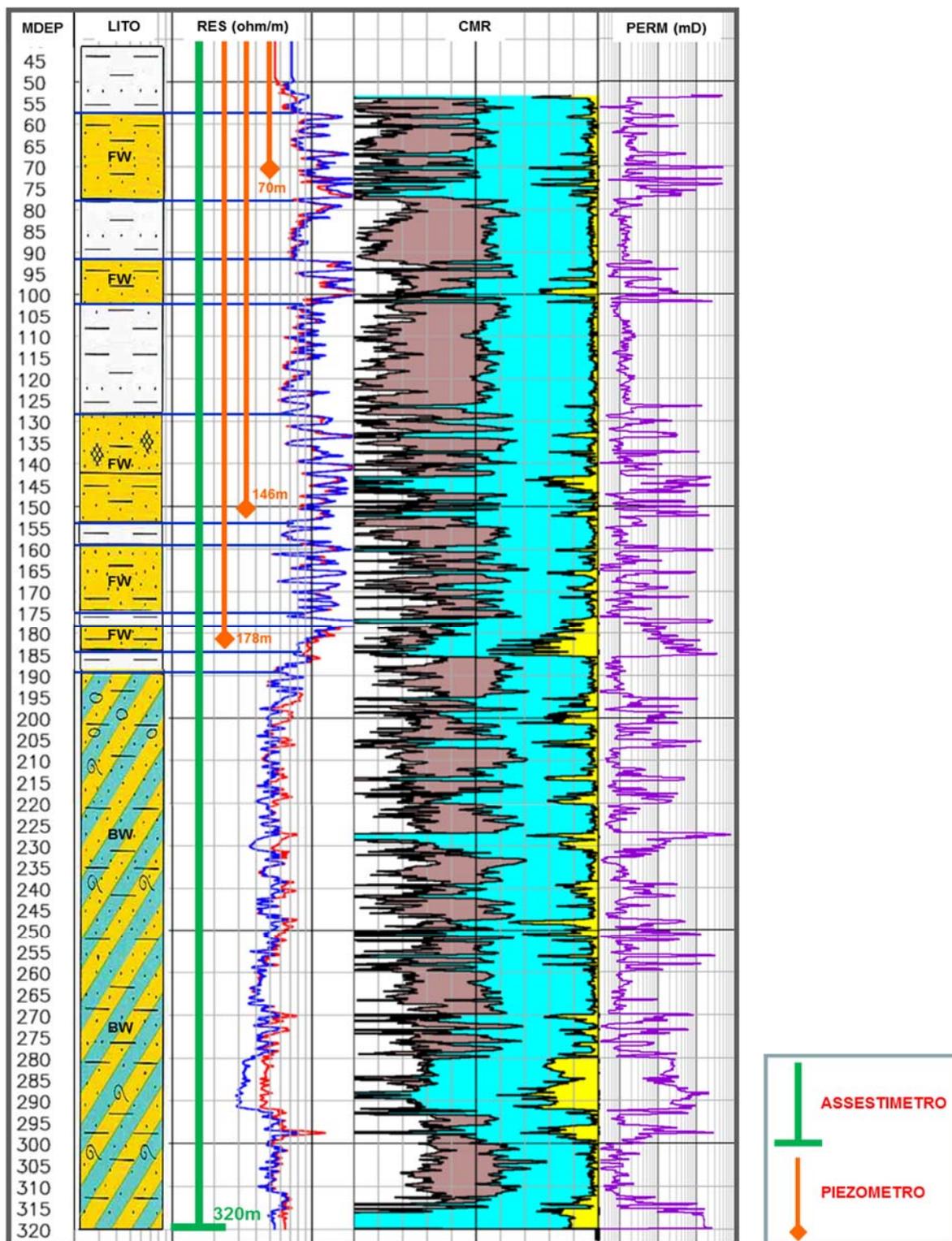


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

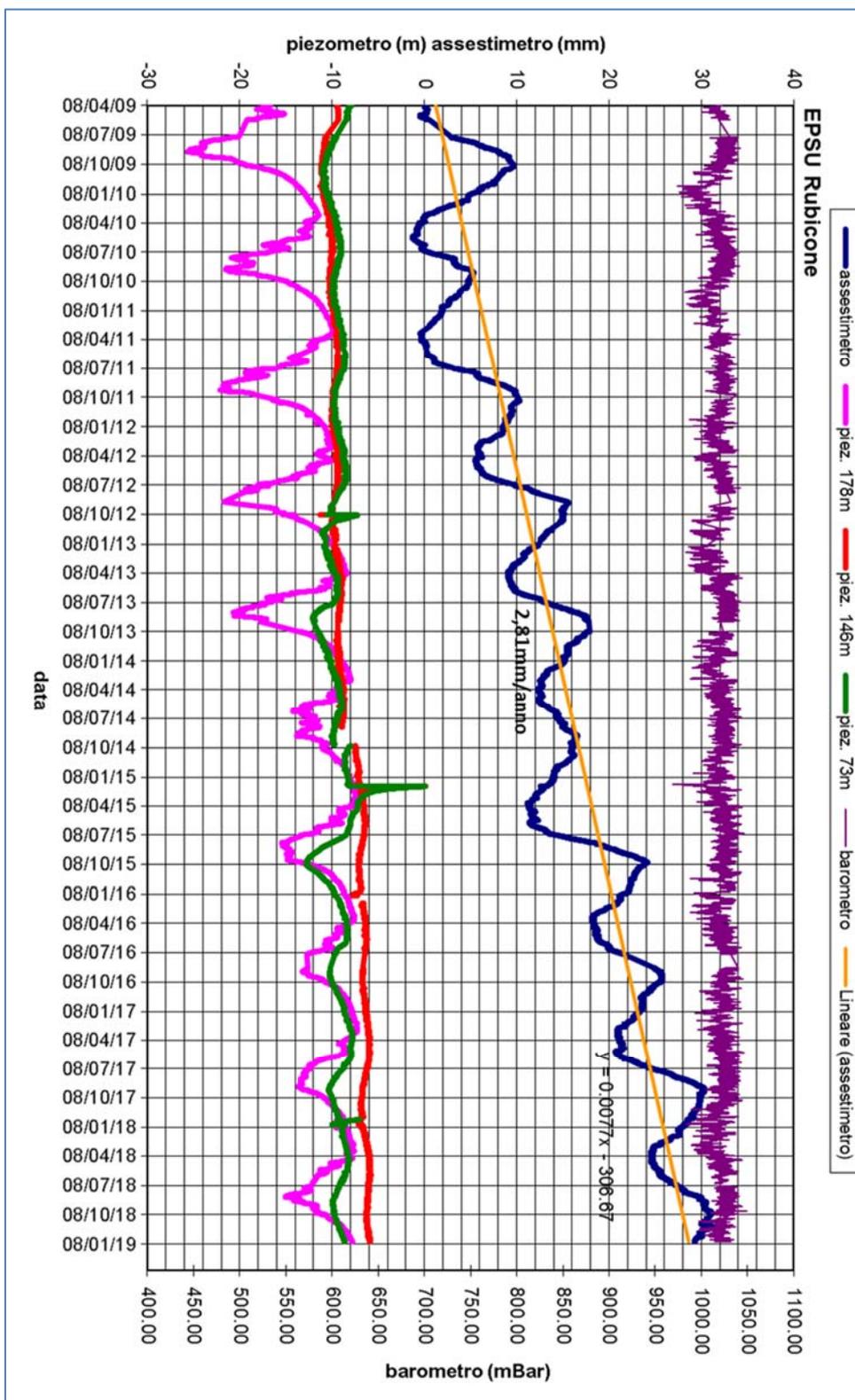


Figura 6B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche

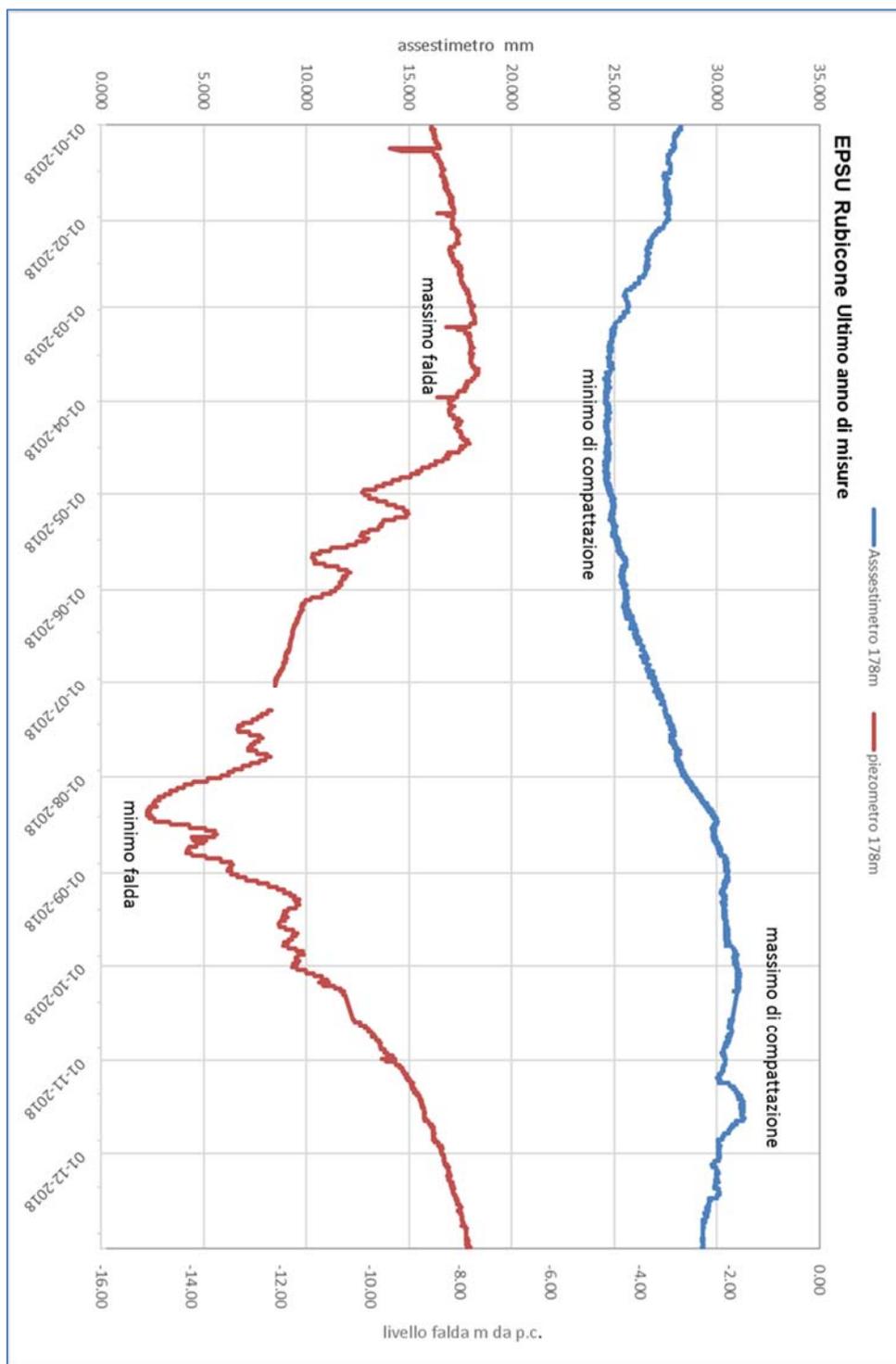


Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestometriche

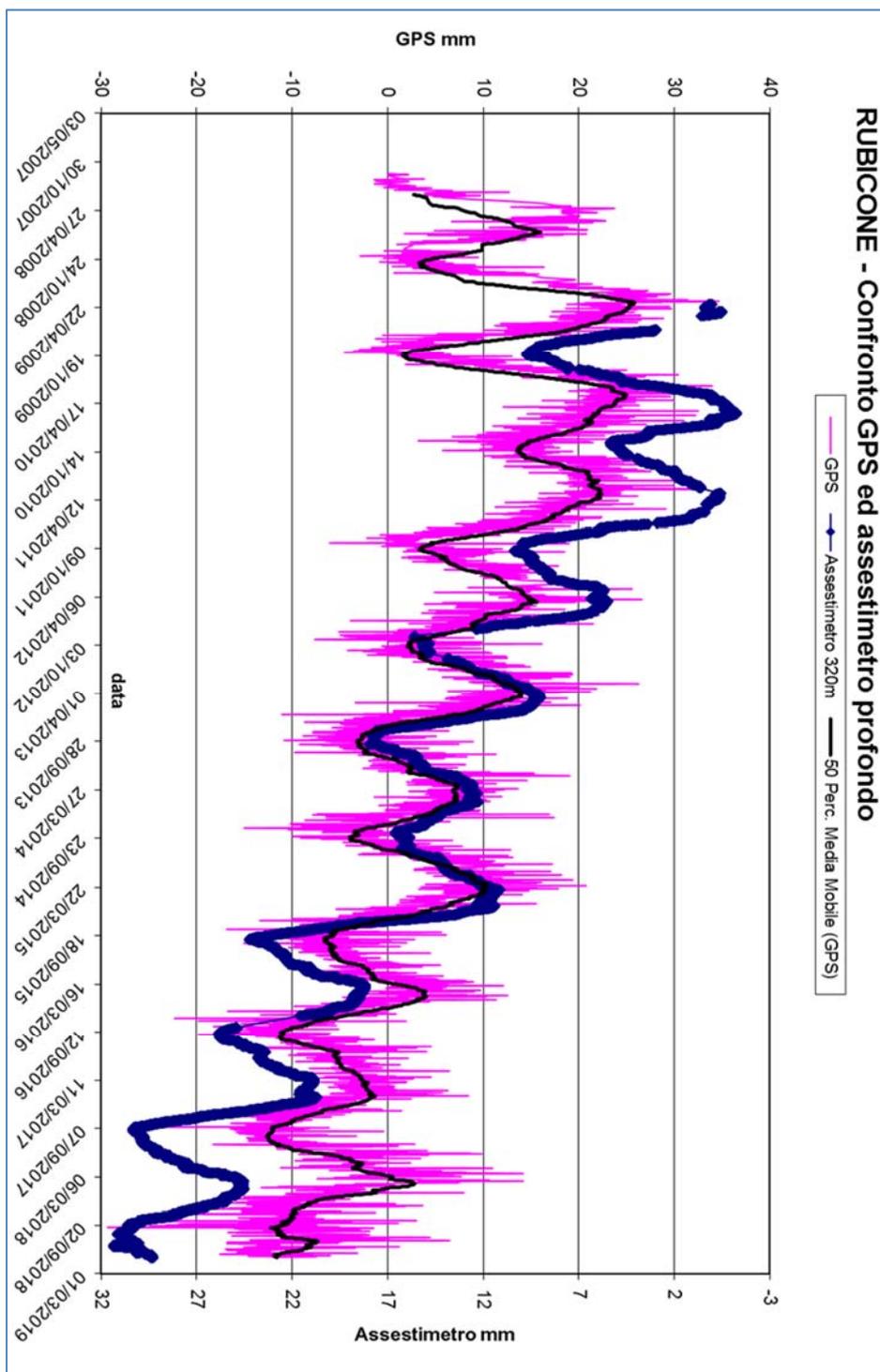


Figura 8B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche

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:

- 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 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'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 11B) 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 ± 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 (-0.007mm/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, raggiungendo

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.

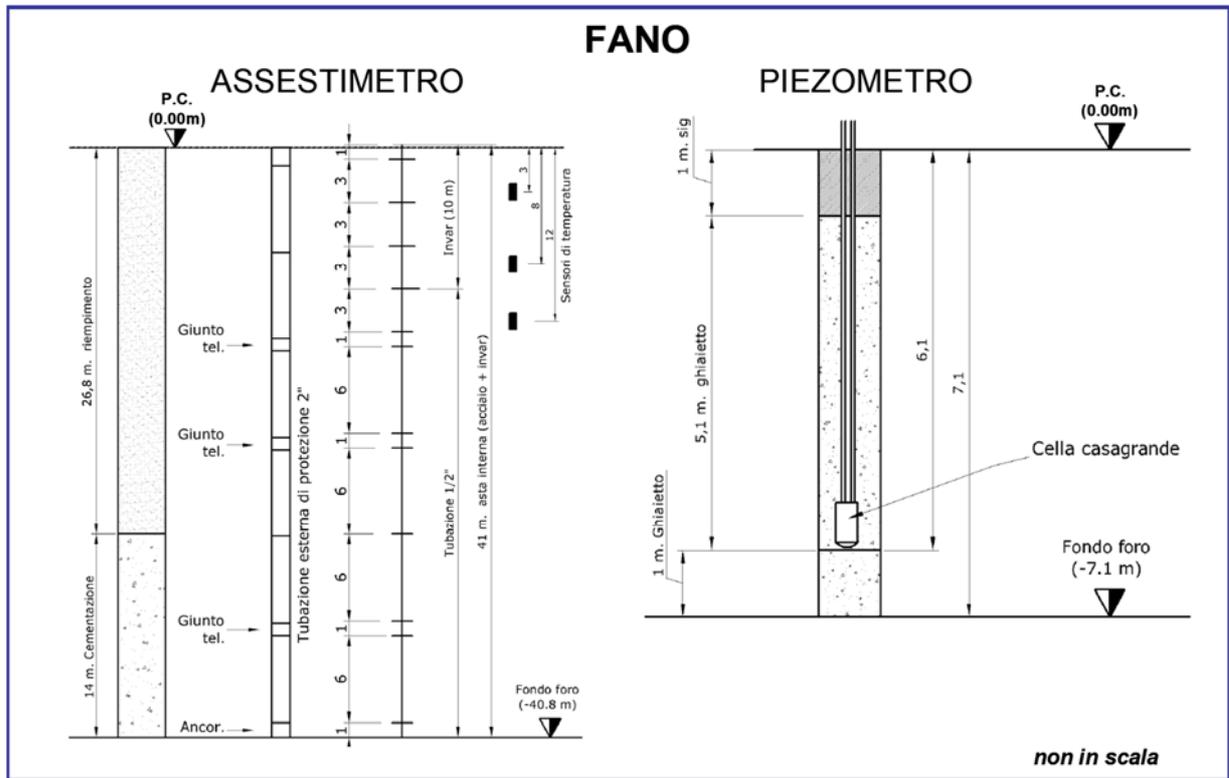


Figura 9B - Stazione EPSU di Fano

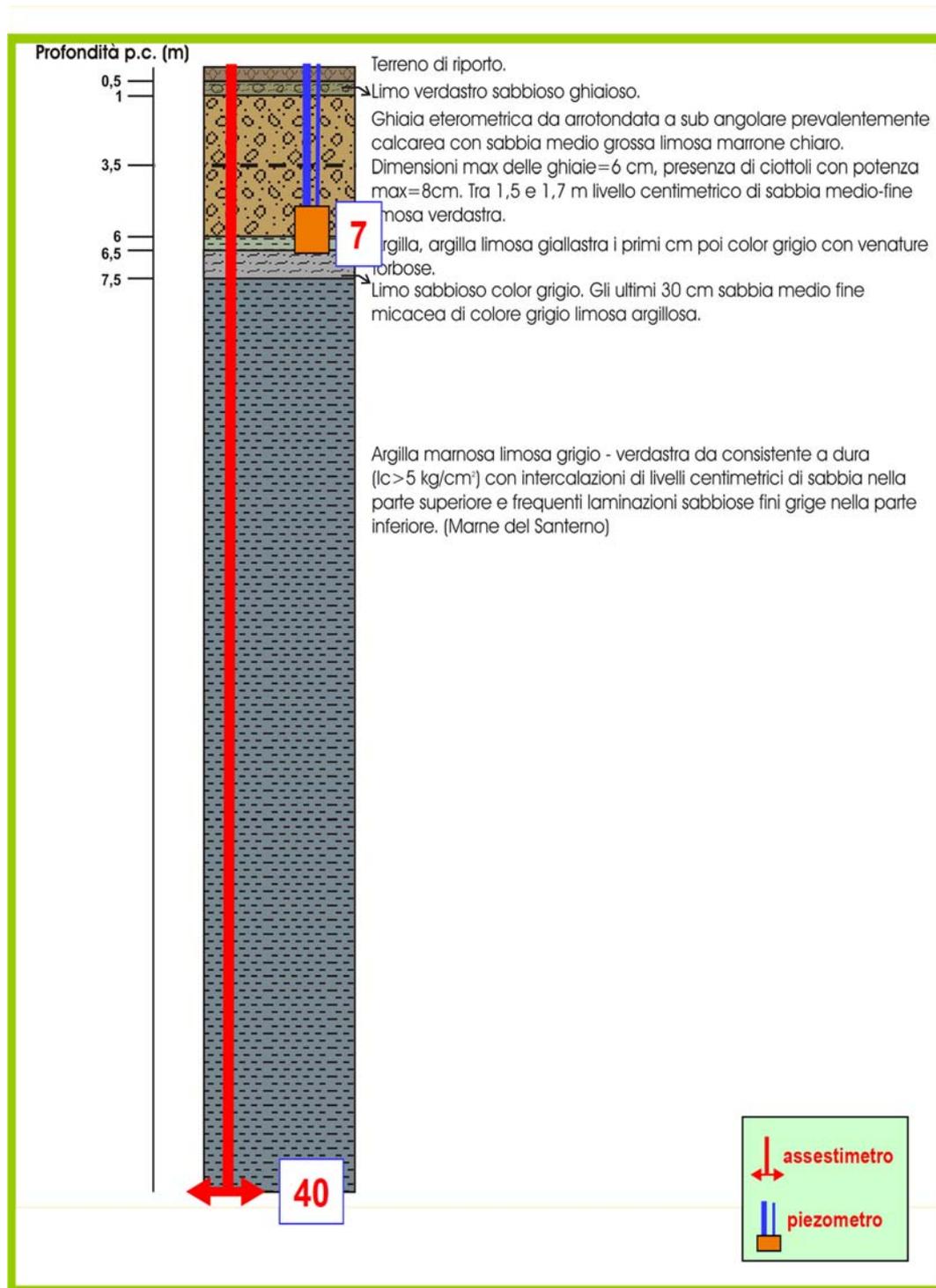


Figura 10B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Fano

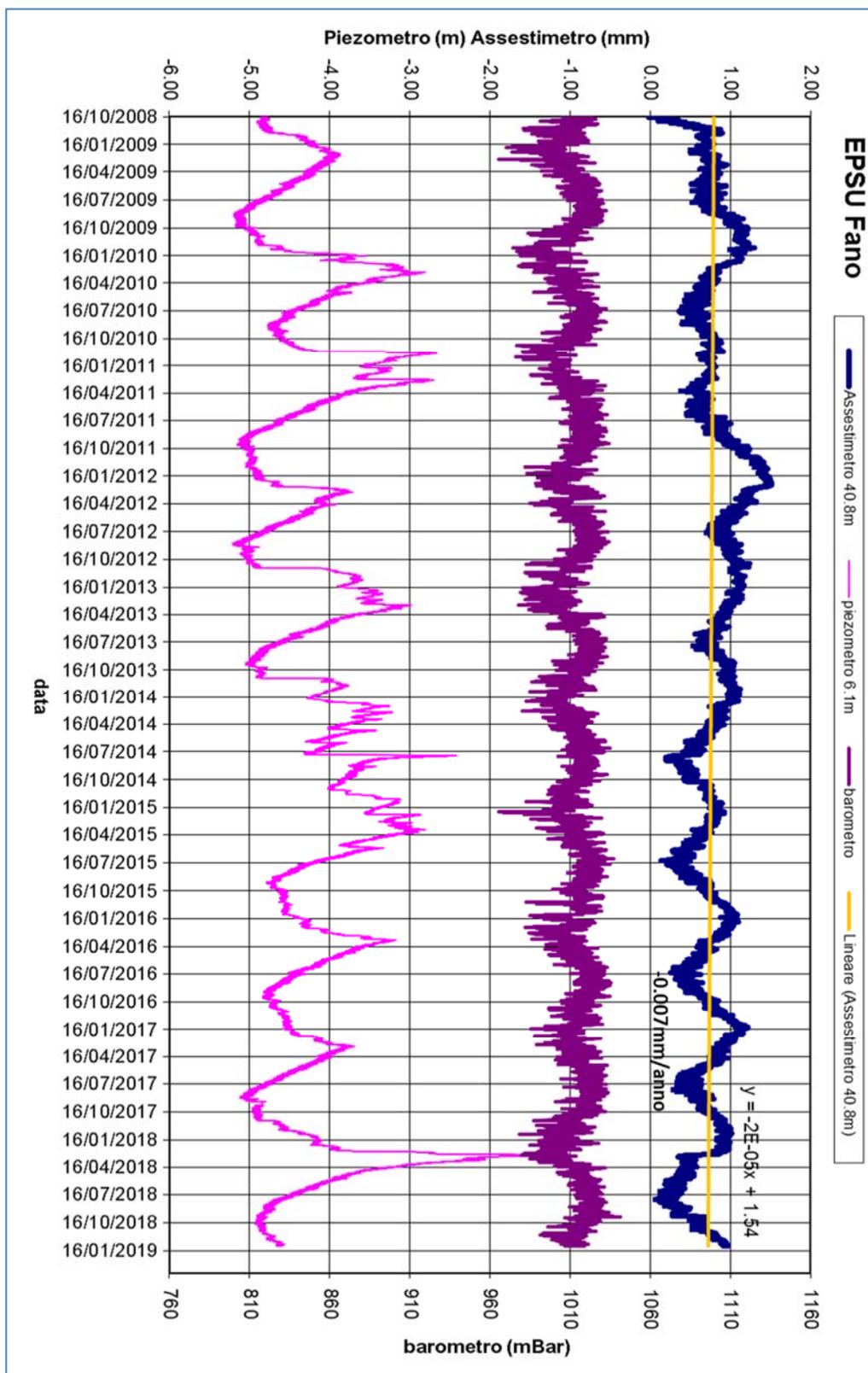


Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche

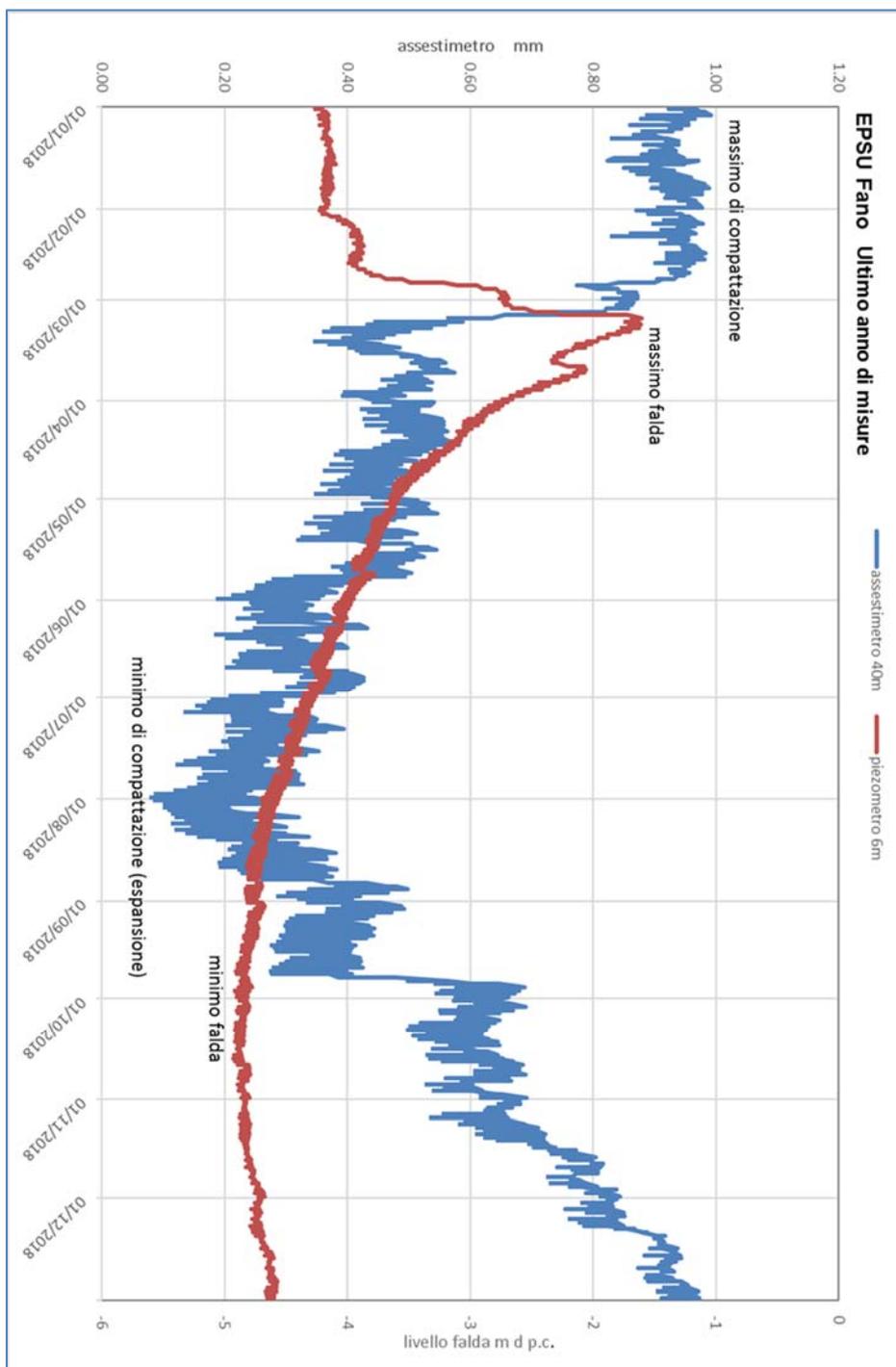


Figura 12B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche

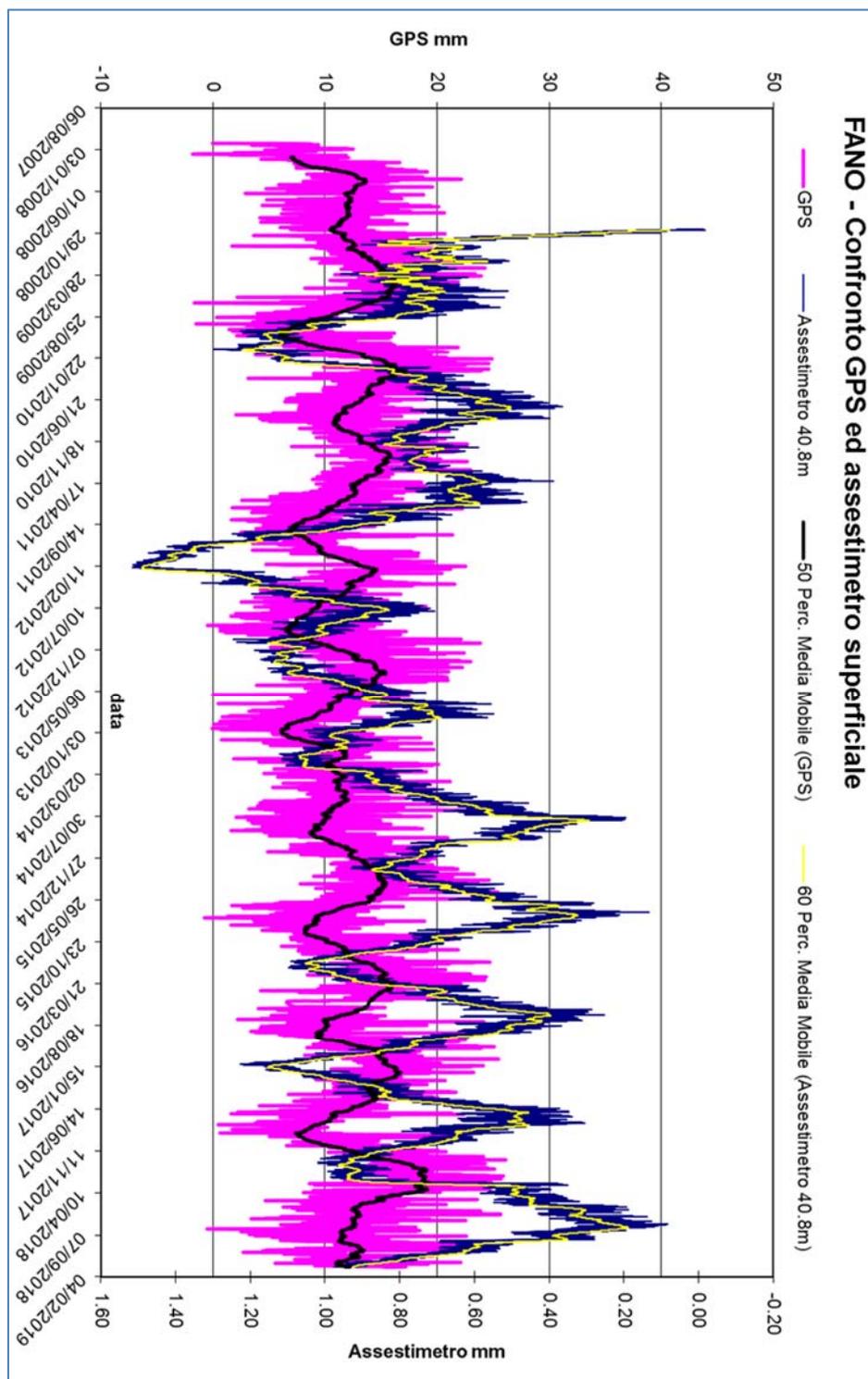


Figura 13B - Stazione EPSU di Fano: confronto fra misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche

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:

- assestometro - quota bottom: 40.3 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella: 21 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 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'assestometro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra il piano di campagna (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (40.3 m da p.c.).

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

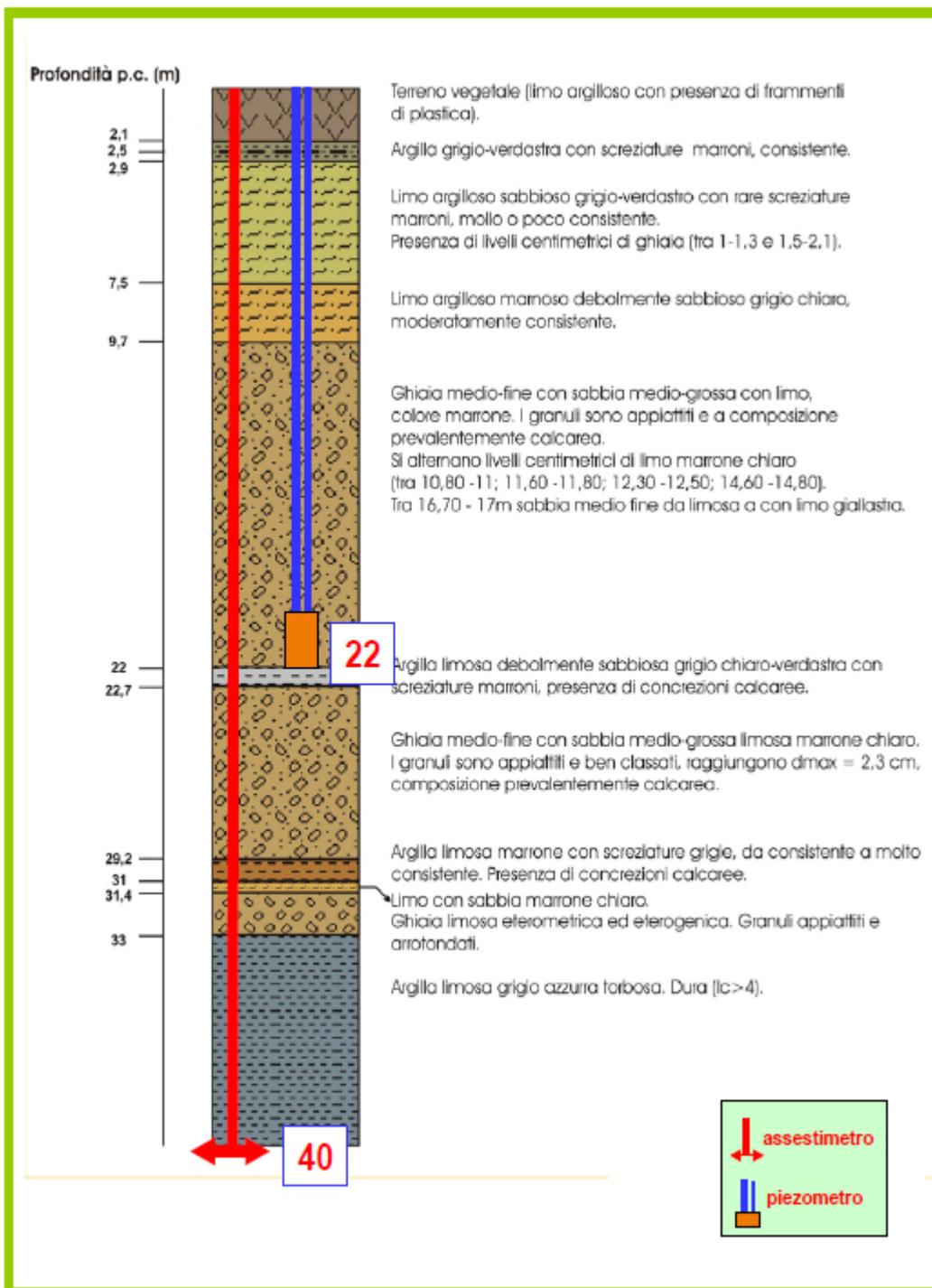


Figura 15B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

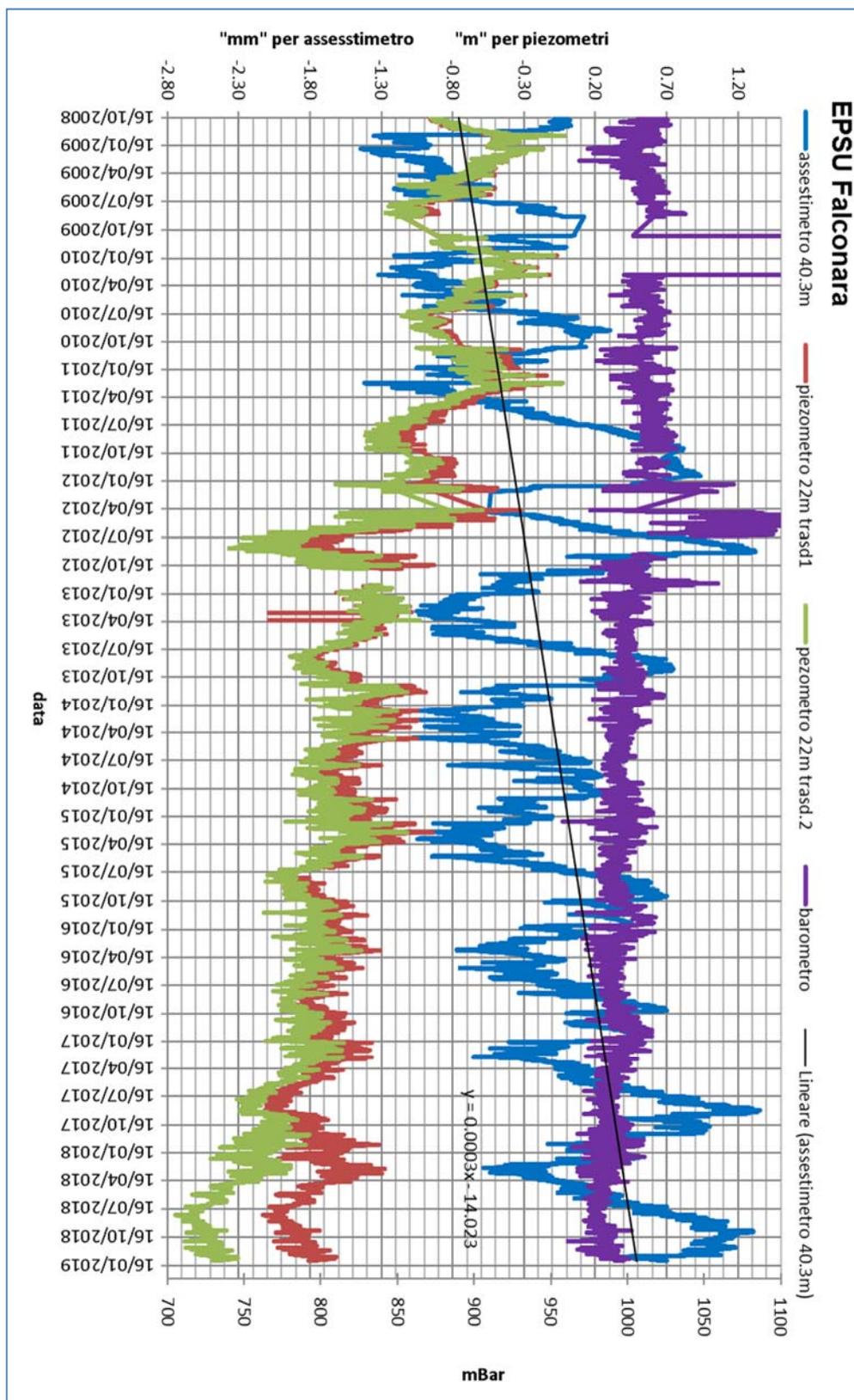


Figura 16B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche

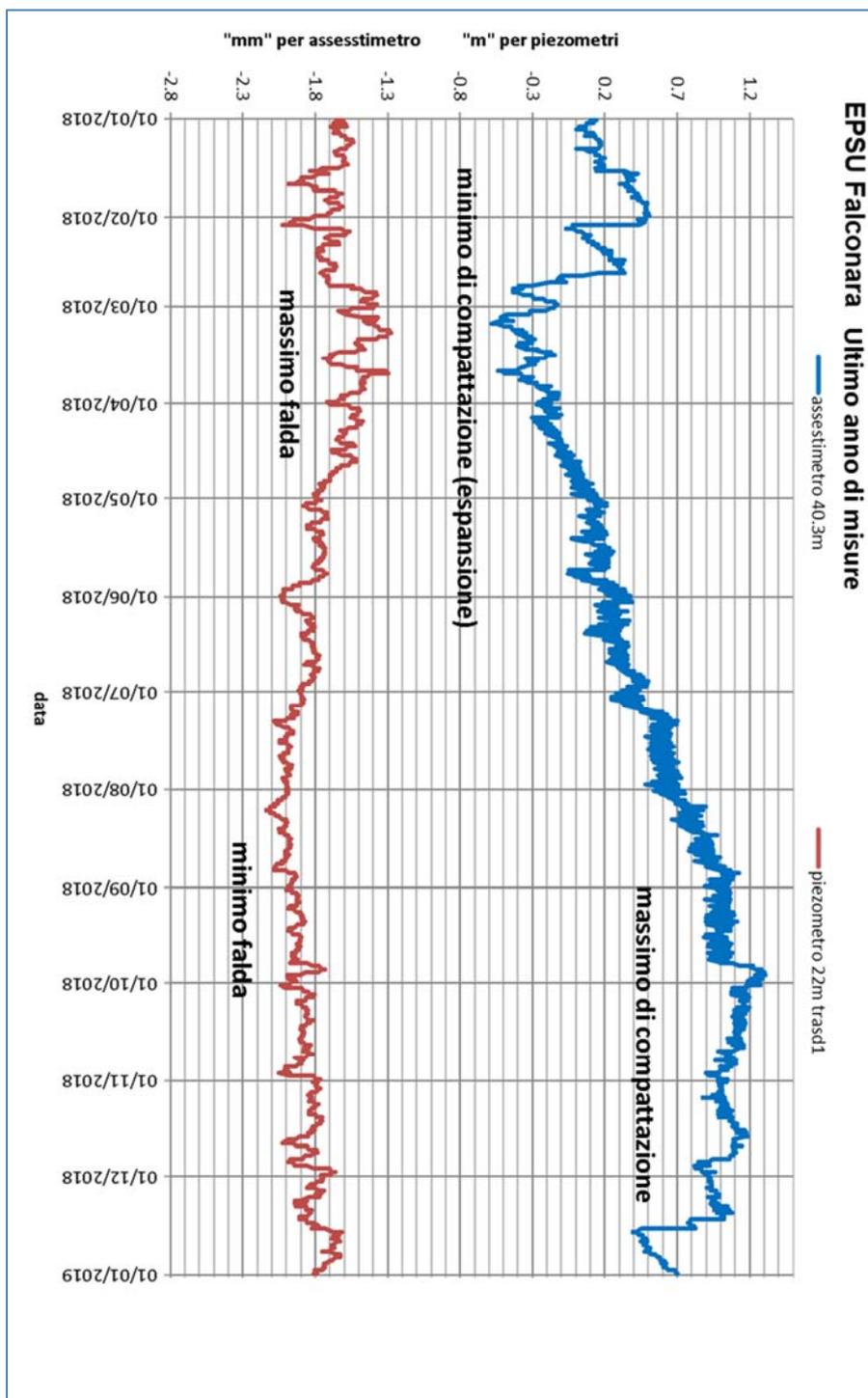


Figura 17B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche

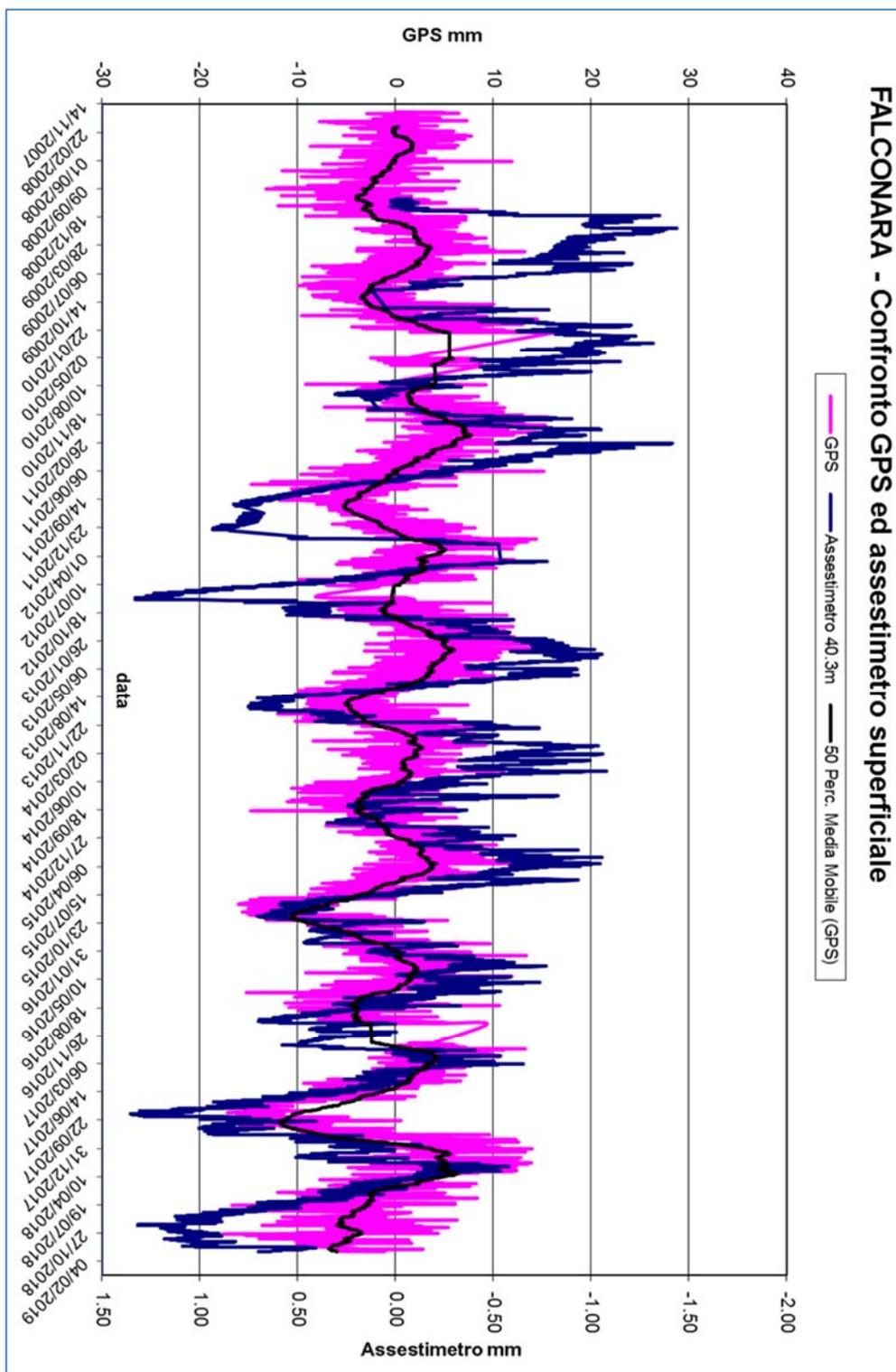


Figura 18B - Stazione EPSU di Falconara: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche

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 (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 semplicemente 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