

Campo di Naomi-Pandora

Aggiornamento al 31/12/2018

Il campo di Naomi-Pandora è composto da due giacimenti, distanti 5 km l'uno dall'altro, che sono ubicati nell'offshore adriatico (concessione A.C33.AG - Eni 100%) a circa 35 km dalla costa. La profondità dell'acqua nell'area è di circa 35-38 m (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C33.AG	26/01/2026	Eni	Eni	100%	Emilia-Romagna

I livelli mineralizzati di tali giacimenti appartengono alle medesime formazioni clastiche del Pliocene superiore (Fm. Porto Garibaldi – livelli PL3-H1 e PL3-H2) e si trovano all'incirca alla stessa profondità (2630 m slm). Dette formazioni si sono depositate come riempimento di strutture a canyon sottomarino incise nel basamento (piattaforma continentale croata) e chiudono per pinch-out contro il basamento stesso (Figura 2).

Il campo si sviluppa per uno spessore complessivo di circa 80 m (da 2600 m ssl a 2680 m ssl) e ha un'estensione di circa 78.4 km².

Il giacimento di Naomi è stato scoperto nel 1995 con la perforazione del pozzo esplorativo Naomi 1 che ha rinvenuto mineralizzati a gas i livelli PL3-H1 e PL3-H2. Il pozzo è stato provato e chiuso minerariamente. A febbraio 1995 è stato perforato il pozzo Naomi 1 dirA, che ha verificato la presenza del livello PL3-H1 in posizione di alto strutturale. Anche in questo caso si è fatta la chiusura mineraria. Il giacimento di Pandora è stato scoperto nel 1996 con la perforazione del pozzo Pandora 1 che ha rinvenuto mineralizzato il livello PL3-H1; la struttura di Pandora è adiacente ma spostata più a ovest rispetto a quella di Naomi. Anche il pozzo Pandora 1 è stato provato e chiuso minerariamente. Nel dicembre 1998 Eni ha presentato ai Ministeri dell'Ambiente, dell'Industria e alla Regione Emilia-Romagna un piano di sviluppo del campo di Naomi-Pandora che prevedeva l'installazione di una piattaforma di tipo BEAF, la perforazione di 4 pozzi (2 per il giacimento Naomi e 2 per quello di Pandora) e la posa di un *sealine* per inviare la produzione alla piattaforma Garibaldi T. Nel documento SIA si riportava

un profilo di produzione ottenuto da uno studio di giacimento (modello monocella) del febbraio 1998 che valutava le riserve a vita intera pari a 1611 MSm³ producibili in 12 anni, con un picco di produzione giornaliera di 500 kSm³/g. Con il DEC/VIA n° 5369 del 04/10/2000, il Ministero dell'Ambiente esprimeva giudizio positivo di compatibilità ambientale e approvava il programma lavori presentato.

Lo studio di giacimento di Naomi-Pandora è stato poi rivisto nel 2000 (rel. RAIP n.021-00 dell'agosto 2000, "Revisione Modello 3D dinamico per Fattibilità"), aggiornando sia il GOIP complessivo del campo a 3454 MSm³ (di cui 2955 MSm³ attribuibili a Naomi e 499 MSm³ a Pandora), sia il volume di riserve producibili al 2030 e risultate pari a 2340 MSm³ (fattore di recupero del 68%). Nel 2001 si è sviluppato il campo perforando e completando 3 pozzi (Naomi 2 dir, Naomi 3 dir e Pandora 2 dir); un quarto pozzo perforato (Naomi 4 dir) è stato dedicato al monitoraggio della compattazione profonda con l'installazione di *marker*.

I pozzi sono stati aperti alla produzione nell'agosto 2001 con una portata iniziale di circa 370 kSm³/g e hanno erogato sino al 1 febbraio 2003. A tale data il campo è stato chiuso a seguito di un provvedimento dell'Autorità Giudiziaria che ha posto i sigilli ai pozzi il 5 febbraio 2003. Nel 2010 è stato autorizzato il ripristino della produzione, avvenuto di fatto ad aprile 2011. Alla riapertura dei pozzi, solo la *string* Naomi 3C ha erogato gas con una portata di circa 150 kSm³/g. Le altre due *string* (Naomi 2L e Pandora 2S) non sono state, invece, in grado di produrre essendosi colmate d'acqua di strato e/o danneggiate nel lungo periodo di chiusura (8 anni circa). Tali eventi sono probabilmente da ricollegare alla non perfetta riuscita delle operazioni di completamento iniziale dei pozzi.

È stato, pertanto, presentato un progetto che prevedeva la perforazione di due *side-track* a partire dai pozzi esistenti di Naomi 2 dir (*side-track* Naomi 2 dirA) e di Pandora 2 dir (*side-track* Pandora 2 dirA) per recuperare le riserve rimanenti del campo (rel. GIAC/CS n. 27-11 dell'agosto 2011). Il progetto è stato realizzato e completato nel luglio 2012.

A gennaio 2011 è stata inoltrata al M.S.E. la "Relazione Tecnica di Giacimento e sullo Stato degli Impianti - Anno 2010" relativa alla concessione A.C33.AG nella quale si è aggiornato lo stato del campo. In tale relazione si riportavano volumi del GOIP (3454 MSm³) delle riserve (2350 MSm³ producibili al 2036) sostanzialmente in linea con le valutazioni dello studio dell'agosto 2000 (2340 MSm³ producibili al 2028).

Nel 2013 è stata fatta una nuova revisione degli studi statico e dinamico di giacimento per il campo di Naomi-Pandora (*rel. GISE-26/13 del 19/12/2013, Campi di Naomi e Pandora – Studio di Giacimento*), che ha aggiornato sia il GOIP complessivo a 3638 MSm³ (di cui 3106 MSm³ attribuibili a Naomi e 532 MSm³ a Pandora) sia il volume delle riserve a 2301 MSm³ (producibili al 2038) che si sono leggermente ridotte (circa il 2%) rispetto a quanto stimato nel gennaio 2011.

Nel corso del 2017 si è nuovamente aggiornato lo studio di giacimento (*rel. GISE 02/2017 del marzo 2017 - Campo di Naomi e Pandora - Studio di giacimento – Scheda Riassuntiva*) con sostanziale conferma delle riserve a vita intera del campo pari a 2300 MSm³ producibili entro il 2037. Nelle Figura 3 sono mostra gli andamenti storici della portata di gas (kSm³/g), d'acqua (m³/g) e del volume cumulativo di gas prodotto al 31/12/2018, pari a circa 1189 MSm³. Nelle Figura 4, Figura 5, Figura 6 sono riportati il confronto tra il profilo di produzione (modello Eclipse 3D del marzo 2017) e la produzione reale. In Figura 7 sono presentati i confronti tra il profilo di pressione calcolato dal modello *Eclipse* 2017 e le pressioni statiche misurate per il livello PL3-H1 che è ritenuto il più rappresentativo del campo. Tale confronto evidenzia il buon accordo tra la previsione modellistica e il comportamento reale di questo livello. Per il campo di Naomi-Pandora si sono fatte diverse previsioni di subsidenza con modelli geomeccanici di complessità crescente in relazione ai dati giacimentologici, dinamici e geomeccanici che via via si rendevano disponibili.

In particolare, per il SIA del dicembre 1998, presentato per l'approvazione del progetto iniziale di sviluppo, si è utilizzato il modello cilindrico di Geertsma basato sullo studio di giacimento (mod. monocella) del febbraio 1998. La subsidenza massima prevista con tale modello è stata a fine produzione di 1.2 cm sul culmine del giacimento di Naomi (*“Valutazione preliminare dei massimi valori di subsidenza previsti per i campi a gas di Naomi e Pandora” - Allegato al S.I.A. per l'istanza di concessione di coltivazione “d.24.A.C. – AG”, progetto Naomi-Pandora - doc. n. 2479 del dic.1998*).

Sulla base delle nuove informazioni acquisite con la perforazione dei pozzi e con i dati dinamici ottenuti dall'analisi del loro comportamento produttivo, si sono completamente rivisti gli studi statico e dinamico di giacimento. Per la parte dinamica si sono fatte simulazioni 3D con il modello *Eclipse* per avere una dettagliata ricostruzione della distribuzione delle pressioni in giacimento.

Il nuovo modello di giacimento è servito, poi, come base per una nuova previsione di subsidenza, eseguita nel 2002 con un modello geomeccanico 3D a elementi finiti (rel. *Isamgeo maggio 2002- Campi a gas di Naomi-Pandora-Modello predittivo di subsidenza*). In tale revisione si è fatta un'analisi dettagliata delle proprietà meccaniche dei livelli in produzione. In particolare, per il coefficiente di compressibilità uniassiale C_m si sono confrontati i valori ottenibili con due diversi metodi:

- a) una correlazione elaborata da ricercatori dell'Università di Padova¹ utilizzando le misure in situ di compattazione profonda fatte in pozzi Eni situati nell'offshore adriatico ed equipaggiati con marker;
- b) un modello geostatistico elaborato da Isamgeo sulla base di dati forniti da Eni comprendenti numerose misure di laboratorio, le misure di compattazione profonda di cui al punto precedente e stime di velocità sismica dei sedimenti profondi dell'area adriatica.

I due diversi approcci hanno prodotto valori di compressibilità uniassiale C_m sostanzialmente equivalenti, per cui si è deciso d'impiegare la correlazione di *Baù et al.* per la stima del coefficiente C_m nelle previsioni di subsidenza.

Per quest'ultime si sono esaminati due casi:

- 1) Caso Atteso. La previsione è stata fatta utilizzando il valore atteso (i.e. più probabile) della compressibilità C_m . I risultati coincidono sostanzialmente con quelli del modello cilindrico di Geertsma sia per il valore massimo di subsidenza (1.4 cm alla fine della produzione prevista nel 2031) che per l'estensione del cono di subsidenza.
- 2) Caso Pessimistico. La previsione è stata fatta utilizzando i valori di compressibilità uniassiale C_m corrispondenti alla curva superiore al 95% della correlazione di *Baù et al.* In pratica i valori di C_m impiegati sono stati il doppio di quelli del "Caso Atteso". I risultati sono stati di una subsidenza massima di circa 3 cm a fine produzione; l'estensione del cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 1 cm)² è ovviamente risultata estremamente contenuta e confinata sulla verticale dei giacimenti.

¹ Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., and Teatini, P., 2002. Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Geotechnique*, Vol. 52, No. 8, pp. 605-616.

² Nei modelli geomeccanici di Naomi-Pandora realizzati da Eni nel periodo 1998-2003 l'estensione del cono di subsidenza è stata fatta corrispondere alla linea d'iso-subsidenza di 1 cm. All'epoca, infatti, non erano ancora disponibili gli studi condotti dalla Commissione Scientifica Internazionale (CSI), nominata da Eni e presieduta dal Prof. E. Boschi che, su tale argomento, ha concluso che la linea d'iso-subsidenza di 2 cm è da considerarsi "the limit of any physical identification of induced subsidence effects". Gli studi e le conclusioni della CSI

Il modello geomeccanico del 2002 è stato aggiornato nel 2003 (rel. *Isamgeo gennaio2003-Campi a gas di Naomi-Pandora - Modello predittivo di subsidenza - Rapporto Finale*) disponendo di nuove informazioni, quali:

- a) la stima di compressibilità dei livelli Naomi-Pandora ottenuta monitorando la compattazione profonda tramite i *marker* installati nel pozzo Naomi 4D;
- b) la distribuzione delle pressioni nei due giacimenti e nell'acquifero idraulicamente connesso ottenuta da simulazioni con modello *Eclipse* 3D, previa calibrazione con i dati di un anno e mezzo di produzione. Anche in questo aggiornamento si sono esaminati due casi di previsione di subsidenza per valutare la sensitività dei risultati al variare del metodo con cui si sono valutati e scelti i valori di compressibilità uniassiale C_m usati nelle simulazioni.

In particolare:

- Caso A: si sono impiegati i valori di C_m ottenuti dalla correlazione regionale di *Baù et al.* (analogamente a quanto effettuato nello studio del 2002);
- Caso B: si sono impiegati i valori di C_m ottenuti dalle misure in situ sul pozzo Naomi 4D.

I risultati sono stati confrontati sia con le previsioni del modello del dicembre 1998 (allegate al SIA) sia con quelle dello studio Isamgeo del 2002.

Le conclusioni che si possono trarre sono:

1. la previsione di subsidenza del Caso A coincide sostanzialmente con quella sia del modello cilindrico di Geertsma che del modello Isamgeo del 2002 in termini di valore massimo (poco oltre 1 cm) e d'estensione del cono;
2. la previsione di subsidenza del Caso B dà risultati lievemente più pessimistici di quelli ottenuti sia con il modello cilindrico di Geertsma che con il modello Isamgeo del 2002.

Più in dettaglio per quest'ultimo caso si ha:

- la subsidenza massima prevista è di circa 2-3 cm sulla verticale dei due giacimenti;
- l'estensione del cono verso costa è minima e si esaurisce a breve distanza dai giacimenti.

sono stati resi pubblici con il volume "*Land Subsidence – Special Volume*" edito in occasione del *7th International Symposium on Land Subsidence – Shanghai (P.R. China) – 23-30 Oct. 2005*. Pertanto solo a partire da tale data Eni ha considerato nei propri studi la linea d'iso-subsidenza di 2 cm come il contorno esterno che delimita il cono di subsidenza.

I risultati di tutti gli studi geomeccanici eseguiti indicano che un'eventuale subsidenza indotta dalla produzione del campo di Naomi-Pandora sarebbe d'entità trascurabile e non causerebbe alcun impatto sia sulla costa emiliano-romagnola, sia sul delta del Po.

A seguito della ripresa della produzione avvenuta nell'aprile del 2011 e delle nuove informazioni ottenute sul comportamento dei due giacimenti, si sono aggiornati nel corso del 2013 sia gli studi statico e dinamico del campo; sia il modello geomeccanico per la previsione della subsidenza.

I risultati di questo lavoro mostrano, per lo scenario *medio* (scenario di riferimento), un valore massimo di subsidenza di circa 2 cm al termine della produzione del campo (01/01/2038). La massima estensione del fenomeno, valutata come distanza del punto di massima subsidenza dalla linea d'iso-subsidenza dei 2 cm, è di circa 2 km al termine della produzione. Dopo 30 anni dalla fine della produzione (01/01/2068) il valore massimo di subsidenza si assesta sui 3 cm, mentre la massima estensione è di circa 3 km. Il fenomeno si esaurisce, quindi, a una distanza di circa 34 km dalla linea di costa. Tale valore rimane inalterato anche tra il 2038 e il 2068.

Per lo scenario *Upper*, invece, al termine della produzione del campo (01/01/2038) il valore massimo di subsidenza previsto è di 6 cm e la massima estensione del fenomeno è di circa 8 km. Dopo 30 anni dalla fine della produzione (01/01/2068) il valore massimo di subsidenza è previsto raggiungere i 7 cm, mentre la massima estensione rimane invariata (8 km). Nello scenario *Upper* il fenomeno si esaurisce a una distanza di circa 29 km dalla costa, distanza che rimane inalterata tra il 2038 e il 2068

A seguito dell'aggiornamento dello studio di giacimento (*rel. GISE 02/2017 del marzo 2017 - Campo di Naomi e Pandora - Studio di giacimento – Scheda Riassuntiva*), nel corso del 2017 si è nuovamente aggiornato anche il modello geomeccanico per la previsione della subsidenza (*rel. EORG 07/2017 di dicembre 2017 - Campo di Naomi e Pandora - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary*). L'unico scenario produttivo previsto per la fase di Forecast è il *Do Nothing* che prevede di proseguire lo sviluppo dei giacimenti mediante i 3 completamenti già aperti alla produzione senza ulteriori interventi. Per quanto concerne gli scenari geomeccanici, sono stati utilizzati due scenari di compressibilità (Cm): Medio e Upper.

In Tabella 1 sono schematizzati i risultati del modello per gli scenari considerati:

Tabella 1 – Andamento temporale della subsidenza totale (in cm) prevista in corrispondenza del CGPS in piattaforma e del punto di massima subsidenza per i casi Cm Medio e Cm Upper

Data	Cm MEDIO		Cm UPPER	
	GPS	Massimo	GPS	Massimo
01/01/2017	0.8	1.3	1.9	3.2
01/01/2030	1.5	2.3	4.0	6.2
01/01/2040	1.7	2.5	4.5	6.8
01/01/2049	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2053	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2056	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2070	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2083	1.8	2.6	4.6	6.9
01/01/2086	1.8	2.6	4.6	6.9

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza è compreso tra 2.6 cm e 7 cm, a seconda dello scenario di compressibilità considerato (Figura 8);
- la distanza dalla linea di costa della isolina di subsidenza dei 2 cm si attesta ad un valore finale compreso tra 32.6 km (Figura 9) e 27.7 km nel caso, rispettivamente, dello scenario Medio e dello scenario Upper. La distanza dalla costa rimane quasi inalterata tra la data di fine produzione e il 2086 in entrambi i casi.

In Figura 8 viene mostrata l'evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo ed in corrispondenza della piattaforma con CGPS per i casi Cm Medio e Cm Upper.

Nella Figura 9 è riportata la mappa di subsidenza per lo scenario di riferimento (Cm Medio) a fine produzione (2053) e a fine simulazione (2086).

La data di fine produzione differisce leggermente tra il caso Medio (2053) e quello Upper (2049) a causa del diverso comportamento fluido-dinamico dei due sistemi.

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.

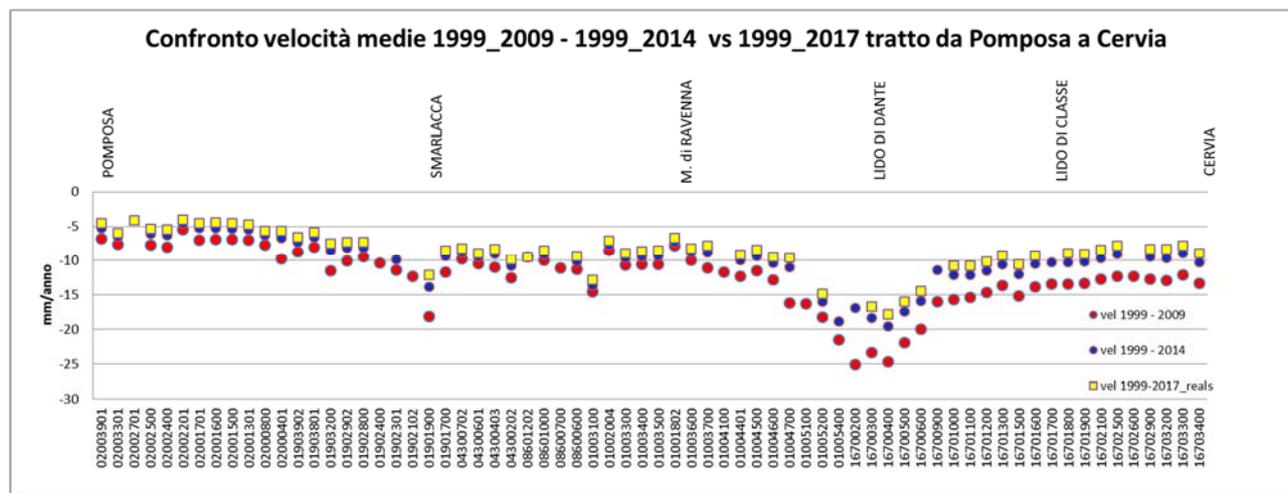
Le operazioni di campagna si sono svolte nel periodo compreso tra agosto e ottobre 2017 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell’ente certificatore.

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell’ente certificatore, è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant’Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d’ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara.

Per il tratto di costa da Pomposa a Cervia - prospiciente i campi di Naomi-Pandora, Guendalina e Tea-Lavanda-Arnica - le livellazioni disponibili non sono completamente omogenee tra loro poiché le quote di alcuni capisaldi sono state misurate solo a partire dal 2003. Di conseguenza si sono stimate con regressione lineare solo le velocità medie d’abbassamento del suolo per quei capisaldi che presentano una serie storica ininterrotta di misure a partire dal 1999.

Tali velocità sono riportate in Figura A per i seguenti periodi: 1999-2009, 1999-2014 e 1999-2017. Il loro confronto mostra come negli ultimi anni si sia registrata una generale diminuzione di dette velocità; diminuzione che è mediamente dell'ordine di 2.4 mm/a.

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



Le misurazioni di campagna si sono svolte nel pieno rispetto delle specifiche tecniche, con il controllo periodico dei supervisori 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 GPS 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 sul manufatto su cui i capisaldi stessi sono stati materializzati.

Al fine d’ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori. Considerando, infatti, nel tratto di costa da Pomposa a Cervia solo i capisaldi con una serie storica ininterrotta di, misure, se ne possono analizzare le relative velocità medie di abbassamento del suolo³ (V_a) - stimate con regressione lineare - raggruppandole nelle seguenti 5 classi:

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

L’elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2017 mostra un trend di generale abbassamento di questo tratto di costa. Il 51% dei punti ricade, infatti, nella classe 3, il 47% dei punti ricade nella classe 4 e solo un caposaldo, con una velocità V_a di 4.5 mm/a, ricade nella classe 2.

L’analisi aggiornata con i dati del 2017 mostra, come descritto in precedenza, un rallentamento della velocità di abbassamento, diffuso su tutto il tratto analizzato. Infatti, si collocano nella classe 2 il 12% dei punti analizzati, il 69% dei punti si colloca nella classe 3 ed è in diminuzione la percentuale dei punti in classe 4 (19%).

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

³ Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie del suolo) sono riportate con valori negativi. Per comodità d’interpretazione, però, nell’elenco che segue le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

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 10).

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

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; negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche 3 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 (Appendice B).

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 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 Naomi-Pandora, 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 11), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la loro generale convergenza con quelli certificati, come mostrato in Tabella 2.

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

Stazione	Dati Non Certificati			Dati Certificati			Delta (Non Cert.-Cert.)		
	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	D-N mm/a	D-E mm/a	D-H mm/a
Naomi-Pandora	18.23	21.65	-1.53	18.21	21.68	-1.89	0.02	-0.03	0.36

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 a 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:
 - o piccoli valori di subsidenza: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il trend previsionale;
 - o grandi valori di subsidenza: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;
- dataset > 36 mesi: analisi di trend e calibrazione dei modelli geomeccanici, confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

Le elaborazioni sono state fatte con software scientifico Bernese, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Come anticipato nella precedente relazione, le elaborazioni dei dati CGPS, sono state effettuate utilizzando il sistema di riferimento ITRF2014 con il software BERNESE 5.2.

Per le nostre elaborazioni il sistema di riferimento è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli outlier delle serie storiche è effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo.

Per il campo di Naomi-Pandora, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale⁴ pari a -2.03

⁴ La "subsidenza totale" rappresenta in questo caso l'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma su cui è installato il CGPS. A determinare tale "subsidenza totale" concorrono vari fenomeni: la compattazione di strati profondi per estrazione di gas (subsidenza antropica), movimenti tettonici e costipazione naturale dei sedimenti (subsidenza naturale), compattazione dei sedimenti più superficiali a fondo mare per effetto del peso della piattaforma. Quest'ultimo fenomeno è evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa.

mm/a (Figura 11 e Figura 13) senza sostanziali variazioni rispetto al valore di -1.5 mm/a al 2017 riportato nella precedente relazione d'aggiornamento.

La storia produttiva del campo di Naomi-Pandora può essere suddivisa in tre fasi distinte:

- una prima fase di produzione da settembre 2001 a marzo 2003 (durante la quale è iniziata la registrazione del CGPS);
- un lungo periodo di chiusura della produzione dei pozzi (2003-2011);
- la ripresa della produzione a partire da giugno 2011.

Durante la chiusura dei pozzi il CGPS ha misurato una velocità media d'abbassamento del fondale marino in corrispondenza della piattaforma pari a ca. -0.9 mm/a (Figura 12): data la lunghezza di tale periodo di chiusura (8 anni ca.), detto valore si può considerare come quello della velocità di subsidenza naturale in quell'area.

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. Per poter confrontare in modo omogeneo le previsioni del modello geomeccanico del dicembre 2017 con i valori di subsidenza rilevati dal CGPS, tale componente naturale è stata sottratta a quest'ultimi.

Il confronto è mostrato in Figura 14 per gli scenari Medio e Upper di detto modello. Si può osservare come le simulazioni riproducano con buona approssimazione l'andamento della subsidenza rilevata dalla stazione CGPS, confermando così l'attendibilità delle previsioni formulate. Al fine di monitorare la compattazione profonda del giacimento, si è proceduto anche per il 2017 al rilievo dei *marker* installati nel pozzo di Naomi 4 dir. Le precedenti registrazioni

con la sonda FSMT (*Formation Subsidence Monitoring Tool*) sono datate 06/2001, 05/2002, 03/2011, 04/2012, 12/2013, 06/2014, 09/2015, 12/2016, 12/2017 e 12/2018.

In Figura 15 sono riportati, pertanto, i risultati delle misure FSMT (espressi in mm) tra rilievi successivi dal 2001 al 2018. È da segnalare che le misure acquisite con il *survey* del dicembre 2013 sono caratterizzate da una deviazione standard così elevata da inficiarne l'attendibilità complessiva, e per tale ragione sono state scartate.

Le misure eseguite nel pozzo Naomi 4dir su un tratto di formazione di circa 60 m, (intervallo di profondità compreso tra 3083.9 m e 3140.8 m) forniscono, per il periodo 2001÷2018, una compattazione totale di circa 41 mm (compattazione totale media, che tiene conto della spaziatura dei marker che risulta essere di 5.25 m invece che 10.5 m).

Tale valore è in sostanziale accordo con i risultati del modello geomeccanico (dicembre 2017), che prevedono compattazioni comprese tra i 23 mm dello scenario Medio e i 61 mm dello scenario Upper (vedi *rel. EORG 07/2017 di dicembre 2017 – Campo di Naomi e Pandora - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary*).

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 Naomi-Pandora siano di piccola entità e, soprattutto, non abbiano alcun impatto sull'andamento altimetrico del tratto di costa antistante.

Si segnala infine che:

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

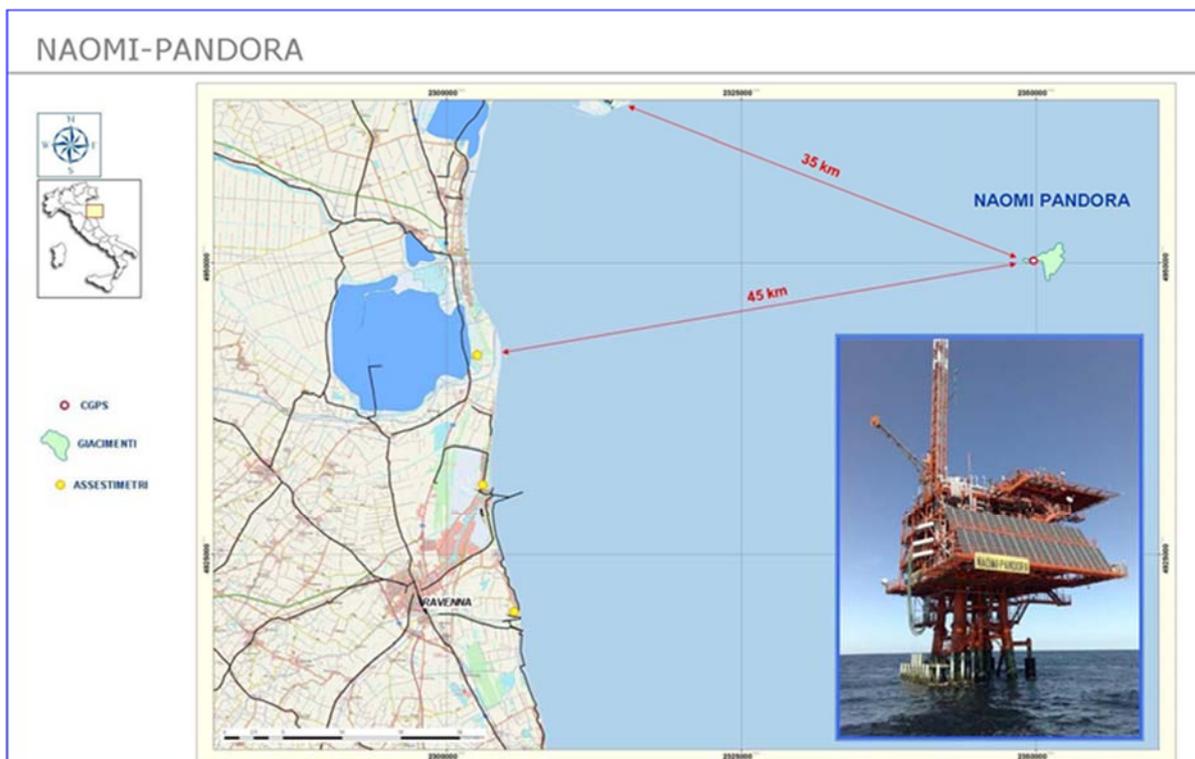


Figura 1 - Ubicazione del campo di Naomi Pandora

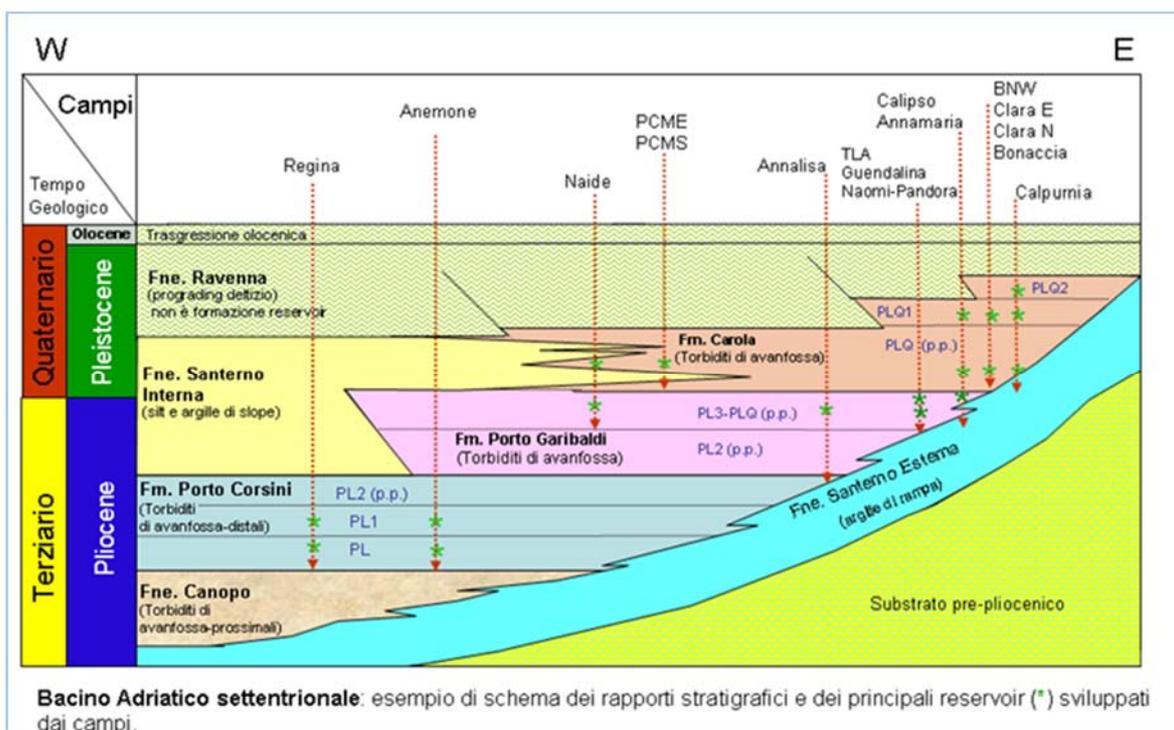


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici

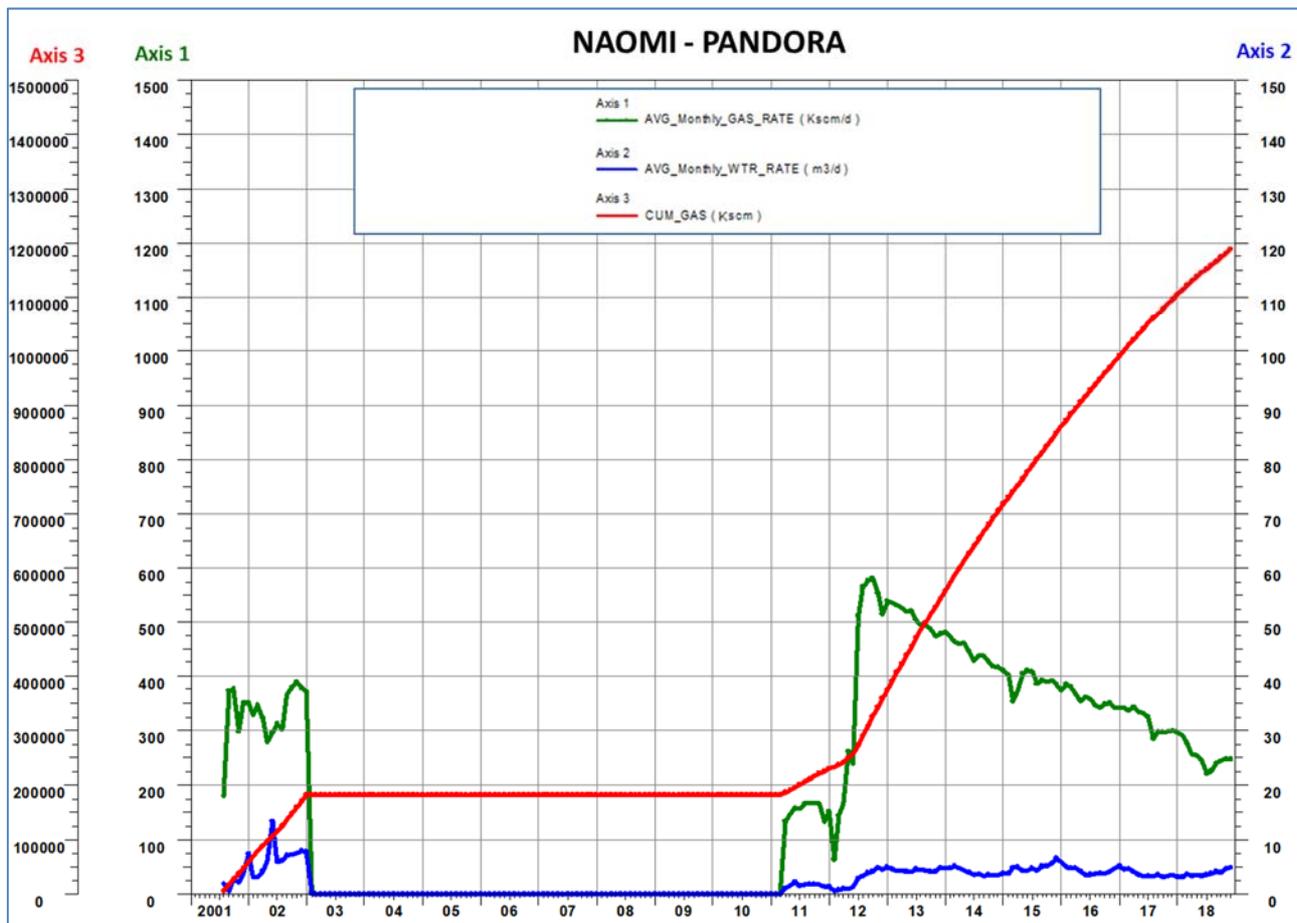


Figura 3 - Campo di Naomi-Pandora: grafico della produzione storica



CAMPI DI NAOMI-PANDORA					
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	
2001	48	48	48	48	2%
2002	123	123	171	171	7%
2003	12	12	183	183	8%
2004	0	0	183	183	8%
2005	0	0	183	183	8%
2006	0	0	183	183	8%
2007	0	0	183	183	8%
2008	0	0	183	183	8%
2009	0	0	183	183	8%
2010	0	0	183	183	8%
2011	43	43	226	226	10%
2012	133	133	358	358	16%
2013	186	186	544	544	24%
2014	162	162	706	706	31%
2015	143	143	849	849	37%
2016	131	131	980	980	43%
2017	116	125	1097	1105	48%
2018	93	122	1189	1227	52%
2019		114		1341	
2020		109		1450	
2021		101		1552	
2022		93		1645	
2023		83		1728	
2024		75		1803	
2025		64		1866	
2026		58		1924	
2027		52		1977	
2028		48		2025	
2029		44		2068	
2030		40		2108	
2031		36		2144	
2032		33		2178	
2033		30		2208	
2034		28		2236	
2035		25		2261	
2036		22		2282	
2037		18		2300	

Figura 4 - Campo di Naomi-Pandora: produzione reale e da modello Eclipse 2017 (riportata fino al 2037)

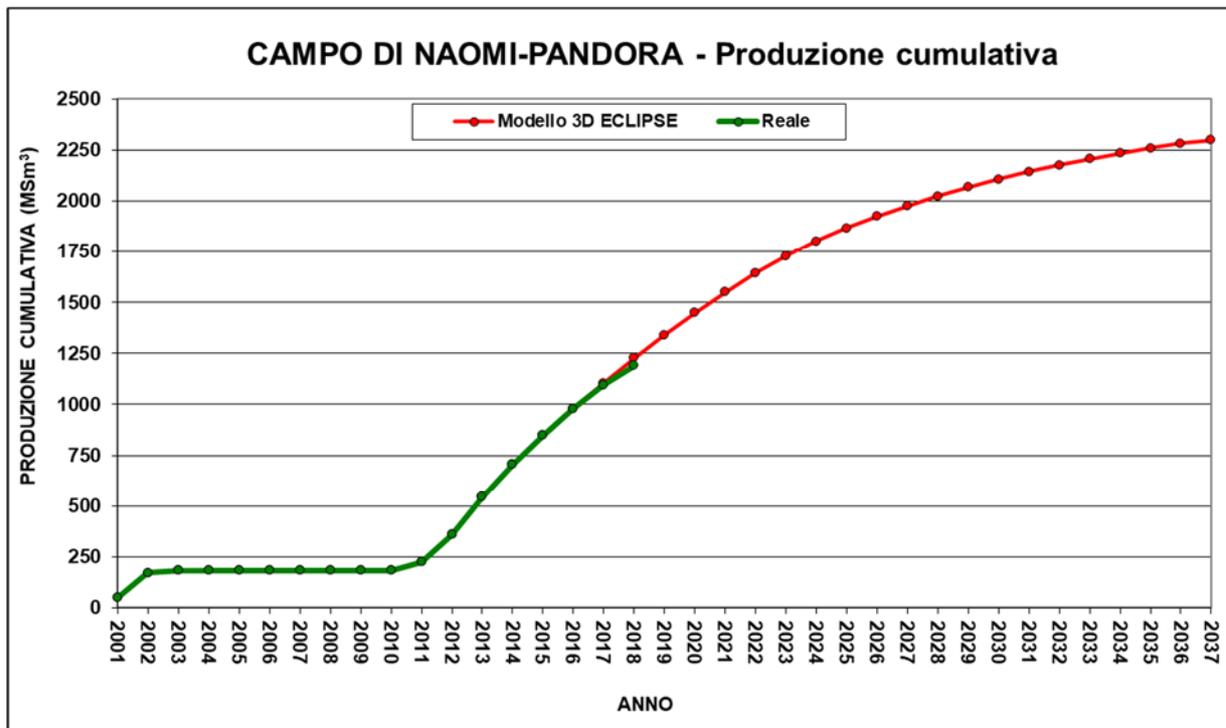


Figura 5 - Campo di Naomi-Pandora: grafico di produzione reale e da modello Eclipse 2017

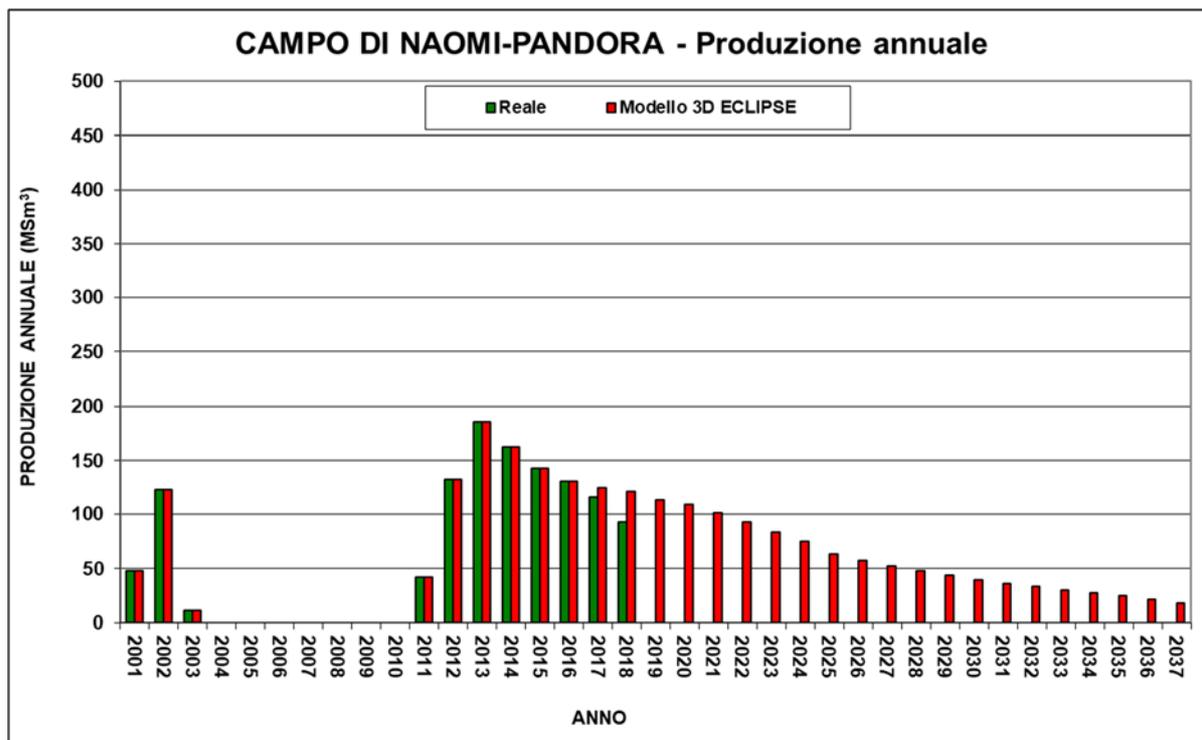


Figura 6 - Campo di Naomi-Pandora: produzione (annuale) reale e da modello Eclipse 2017

CAMPI DI NAOMI-PANDORA			
Data	Livello PL3-H1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/01/1995	295	Nao 1	
09/08/2002	276		Nao 3 C
19/03/2011	284		Pand 2 S
02/08/2011	284		Nao 2 L
30/06/2012	269		Nao 2 C
01/07/2012	273		Pand 2 S
25/06/2014	220		Nao 3 C
09/04/2015	217		Nao 2 C
25/12/2016	195		Nao 3 C
06/01/2018	188		Nao 3 C
16/12/2018	182		Nao 3 C



Figura 7 - Campo di Naomi-Pandora: pressioni statiche misurate e modello *Eclipse* 2017 (liv. PL3-H1)

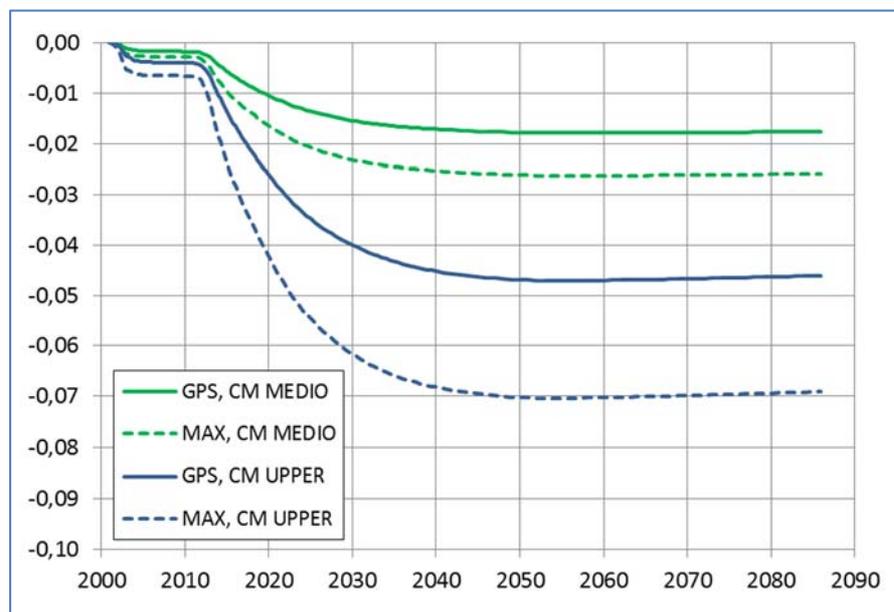


Figura 8 - Campo di Naomi-Pandora: evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo ed in corrispondenza del CGPS in piattaforma per i casi Cm Medio e Cm Upper (modello geomeccanico - dicembre 2017).

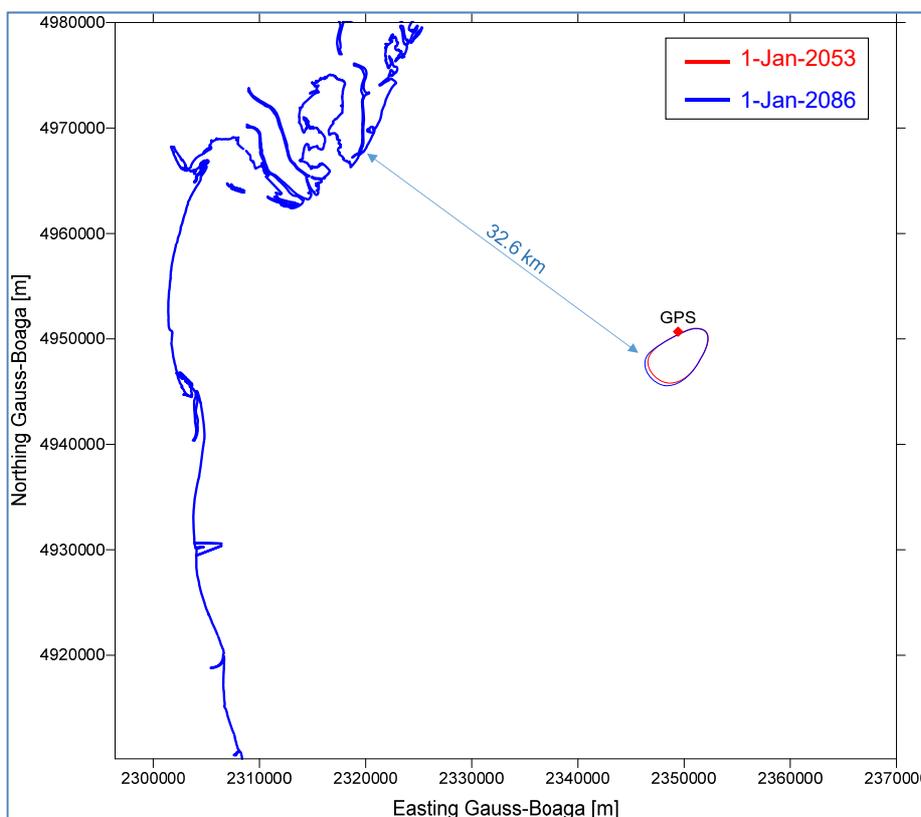


Figura 9 - Campo di Naomi-Pandora: evoluzione temporale della linea d'iso-subsidenza dei 2 cm per lo scenario Medio a fine produzione (2053) e a fine simulazione (2086) (modello geomeccanico dicembre 2017)

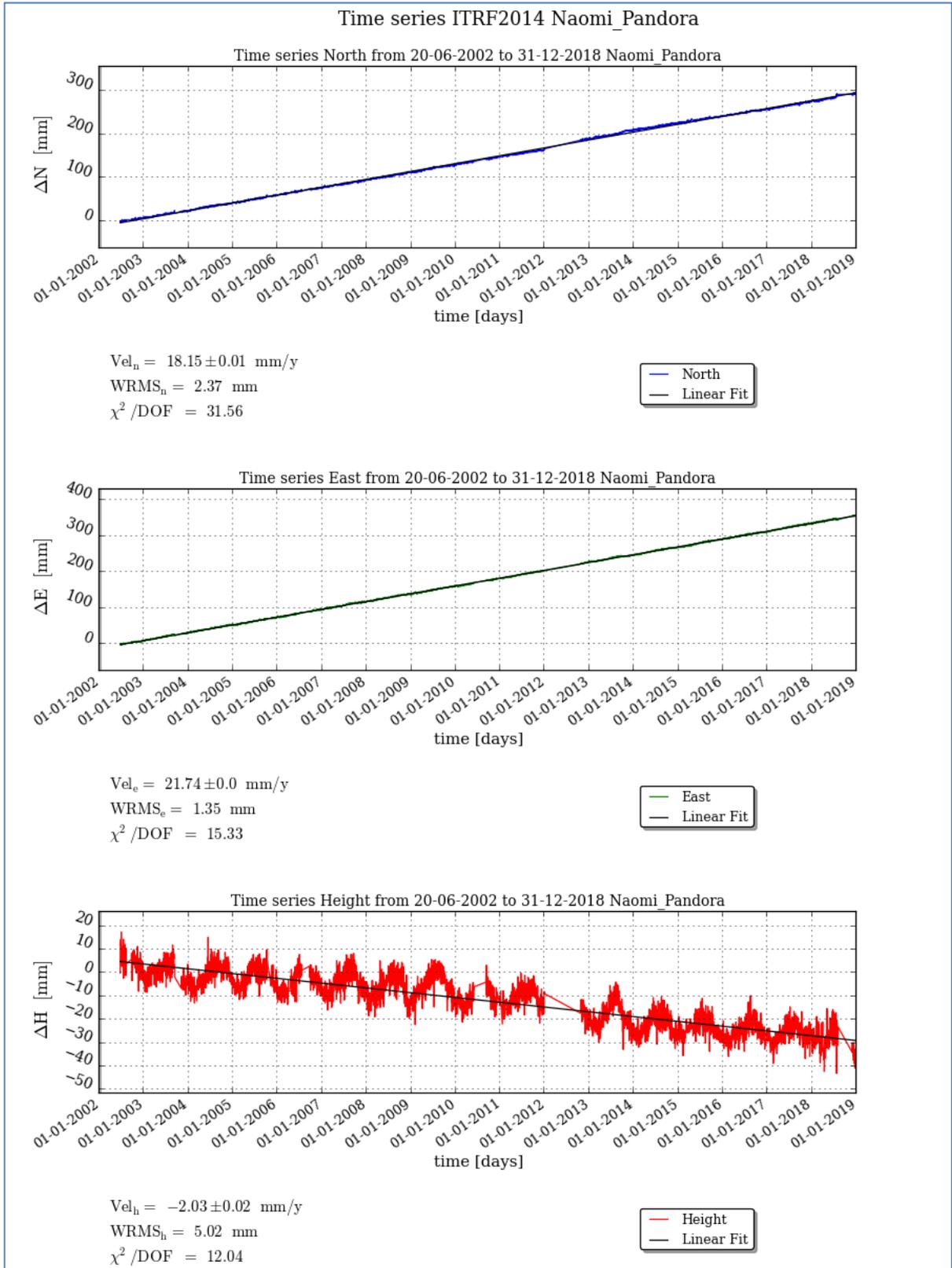


Figura 11 - Campo di Naomi-Pandora: serie storiche di misure CGPS al 31/12/2018

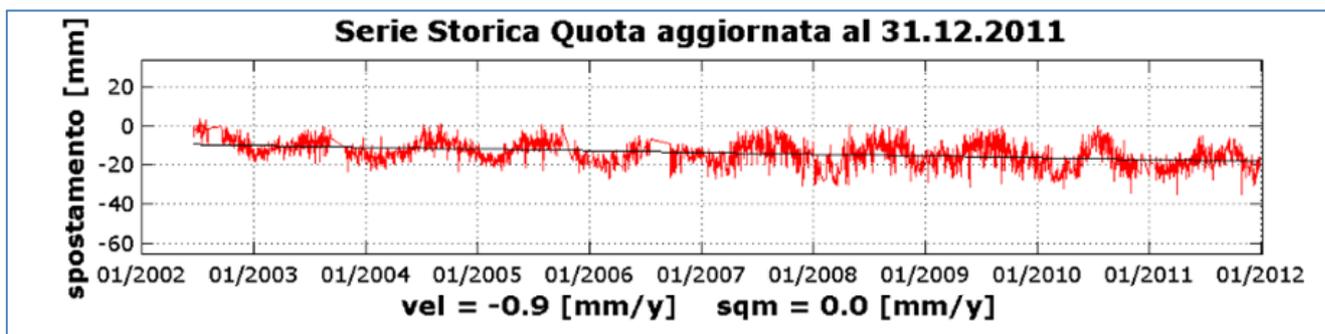


Figura 12 - Campo di Naomi-Pandora: serie storiche di misure CGPS al 31/12/2011

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

Figura 13 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

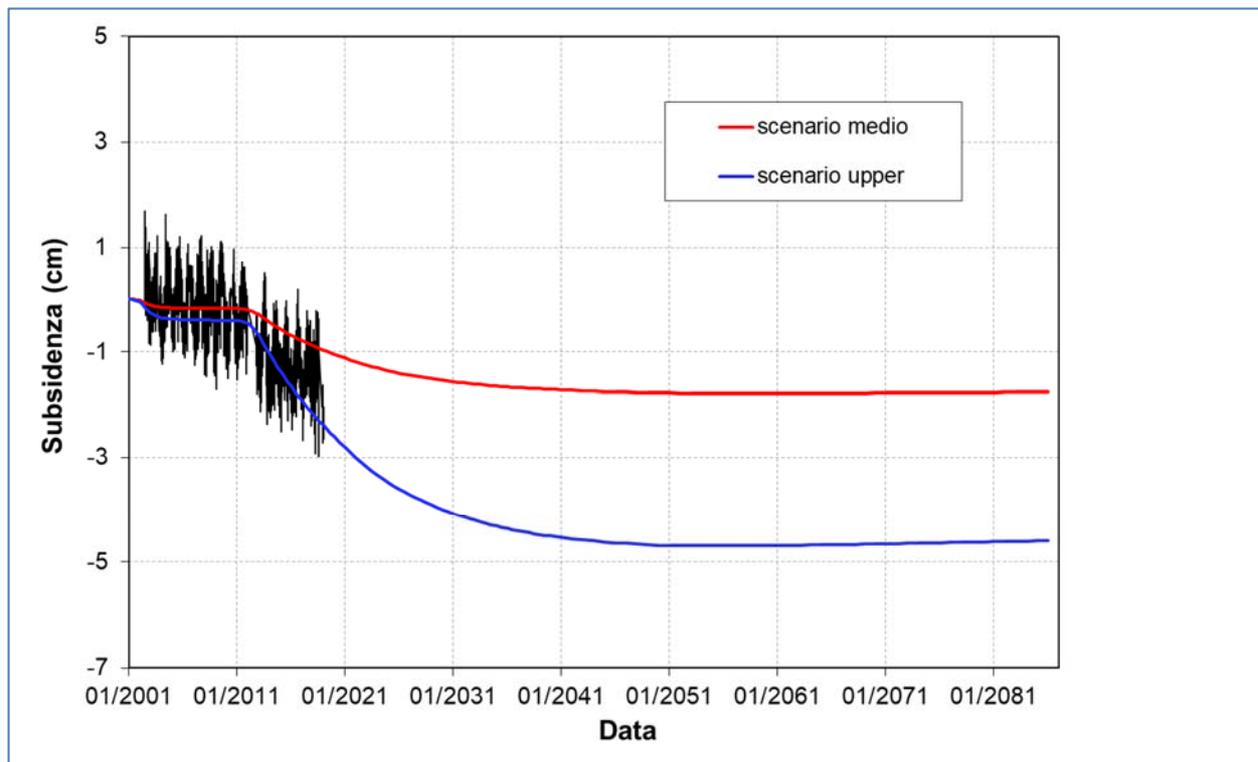


Figura 14 - Campo di Naomi-Pandora: misure CGPS (agg. 31 dic. 2017) vs. modello di subsidenza (modello geomeccanico dicembre 2017)

Compattazione Naomi-Pandora										
spacing #	top ref depth	bottom ref depth	May 2002	Mar 2011	Apr 2012	Jun 2014	Sep 2015	Dec 2016	Dec 2017	Dec 2018
	MD	MD	Jun 2001	May 2002	Mar 2011	Apr 2012	Jun 2014	Sep 2015	Dec 2016	Dec 2017
	m	m	mm							
10	3083.90	3092.30	-3	-1	-2	4	2	-2	0	4
9	3089.00	3099.30	-3	2	-1	5	-2	0	-1	0
8	3092.30	3104.10	-1	-10	13	-2	-1	1	-2	-1
7	3099.30	3109.30	-2	2	8	-6	-5	-4	0	1
6	3104.10	3115.30	-5	4	-4	-6	-1	-5	4	-8
5	3109.30	3120.30	-5	4	0	0	-11	-3	4	-5
4	3115.30	3125.50	-3	-2	5	-5	0	-6	-4	4
3	3120.30	3130.70	-4	4	2	-2	-6	-3	-8	8
2	3125.50	3135.80	-4	2	-2	3	-7	-2	1	-2
1	3130.70	3140.80	-1	4	-6	2	-7	-2	3	0

Figura 15 - Campo di Naomi-Pandora: misure di compattazione in-situ (da FSMT)

campo NAOMI-PANDORA (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DEC.VIA n. 5369 del 04 ottobre 2000	
UBICAZI PROFONDITA' FONDALE		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (NAOMI-PANDORA)	
offshore -35 km dalla costa 35-38 m		SIA	
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE		ULTIMO AGGIORNAMENTO	
terreni piocentrici sup.sabbiosoargillosi Porto Garibaldi PL3 2600 - 2690 (FVDS) fissa monolobata- BEAF torbidi sottili		Studio di giacimento, Rel. GISE-02/2017 (marzo 2017) 2300	
D.M @ ottobre '00 @ 31 dic 2018		STUDIO DI GIACIMENTO	
CONCESSIONE		RISERVE (MSm ³)	
A.C33.AG		Mod. monocella "Febbraio '98" 1611	
DATA SCADENZA CONCESSIONE		MOD. GEOMECCANICO	
26/01/2016		GEERTSMA SEMANALITICO	
N. POZZI		MAX SUBS AL CENTRO (cm)	
3		1,8 (dopo 7 anni)	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³)		DISTANZA DALLA COSTA (km)	
1611		#	
START UP PRODUZIONE		STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
ago-01		LIVELLAZIONI	
FINE PRODUZIONE PREVISTA		ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA) ANTISTANTE IL CAMPO NEL PERIODO 1998-2009, 2011, 2014 e 2017 I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM IL PROSSIMO RILIEVO DELLA RETE DI LIVELLAZIONE (DORSALE ADRIATICA) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
2017		MARKERS	
GAS PRODOTTO (MSm ³)		MARKERS SU NAOMI 4D: ULTIMO SURVEY @ dicembre 2018 SURVEY ESEGUITI: giugno 2001 (rilevo base), maggio 2002, marzo 2011, aprile 2012, dicembre 2013, giugno 2014, settembre 2015, dicembre 2016 e dicembre 2017	
1189		CGPS	
% RISERVE PRODOTTE		OPERATIVO DAL GIUGNO 2001	
52%		SAR	
		ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ OTT 2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DEI CAMPI DI TLA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	

Figura 16 - Campo di Naomi-Pandora: scheda di sintesi dati campo

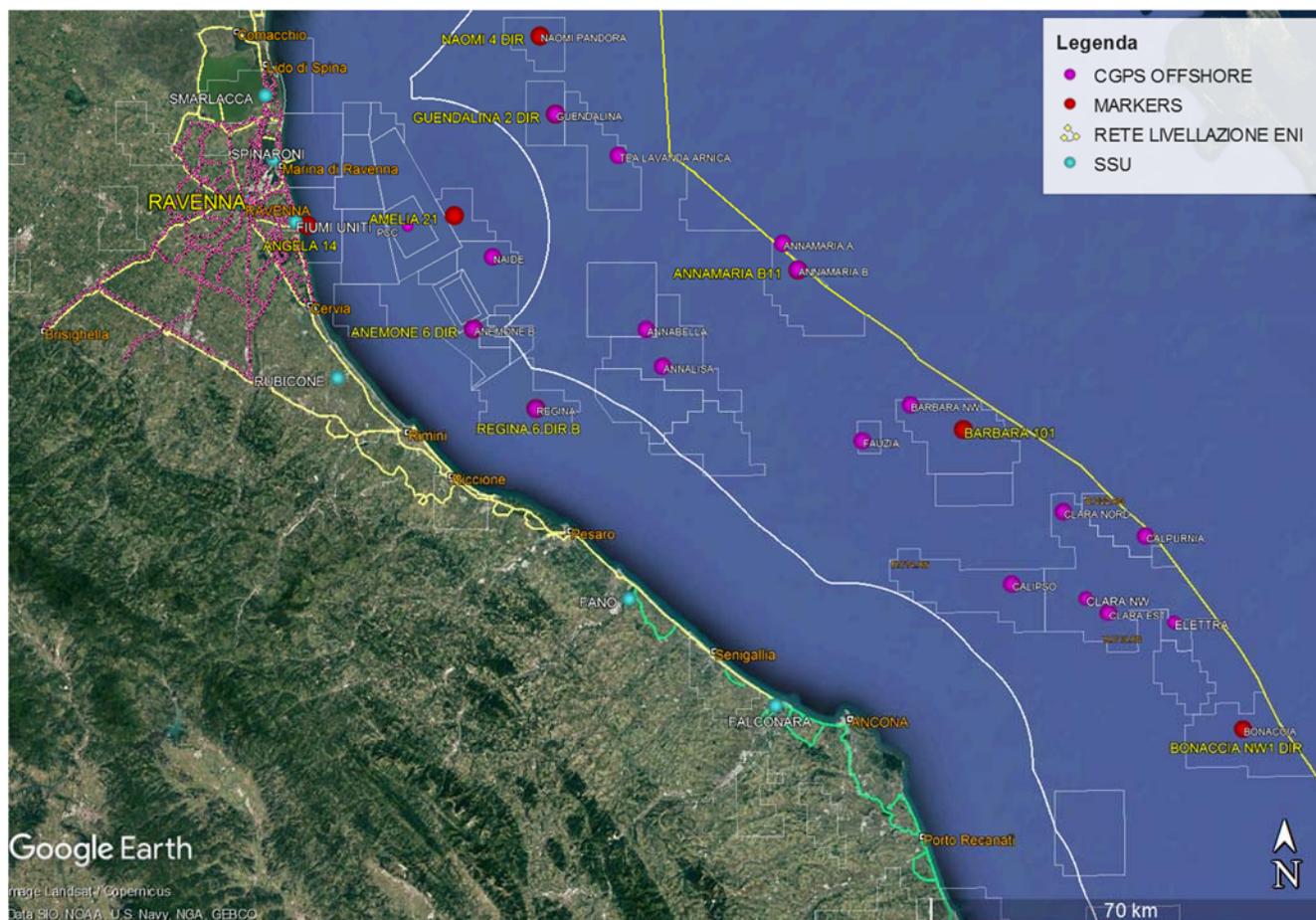


Figura 17 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2018

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

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

Analisi dati InSAR 2003 – 2018

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

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

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

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

Tab. 1. Taratura dato InSAR con misure CGPS

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

- Area di Ravenna
- Area di Fano-Ancona

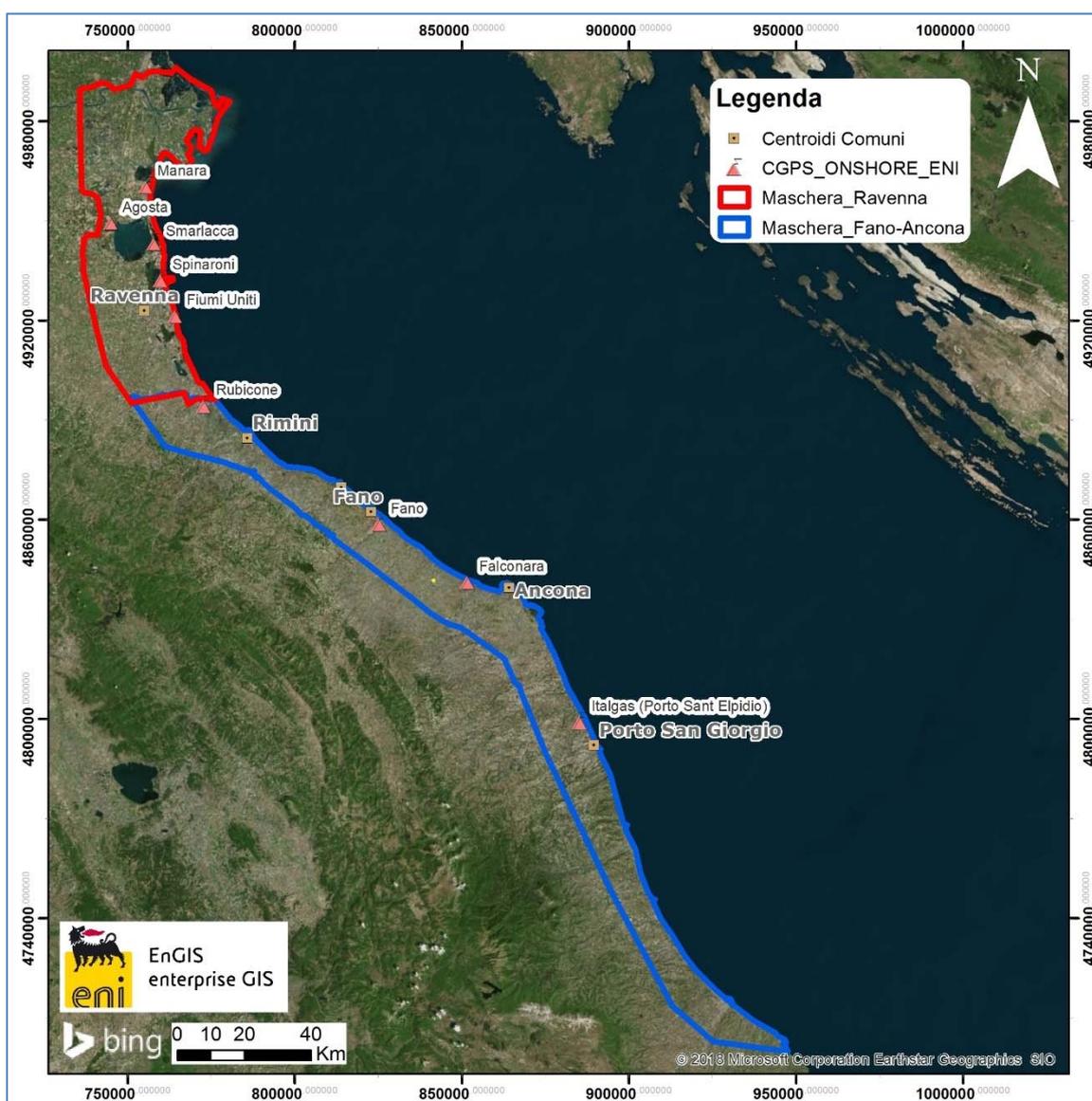


Fig. 1 – Mappa mosaicata dati InSAR

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

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

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

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

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

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

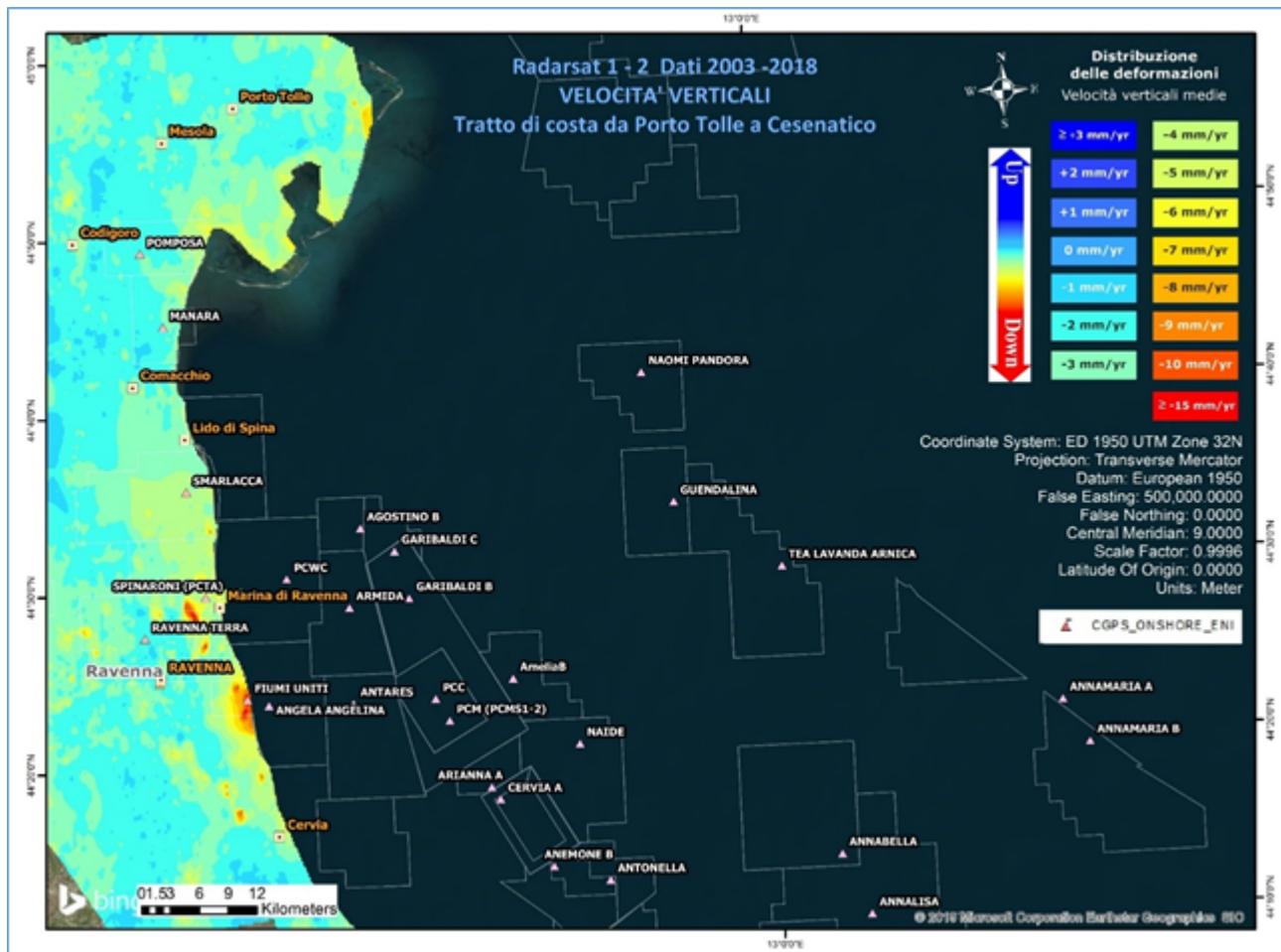


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

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

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

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

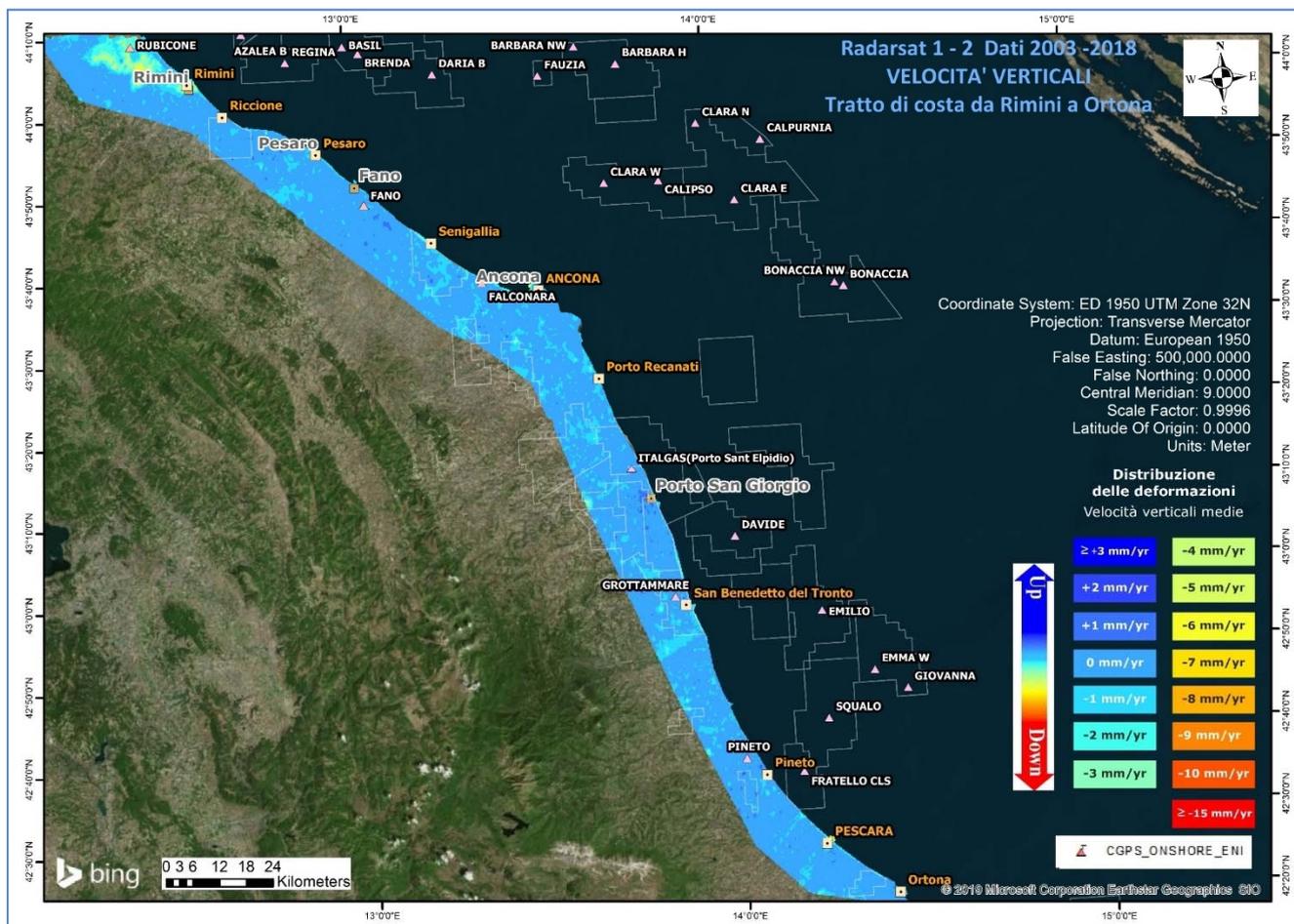


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

Confronto dati SAR 2003 – 2017 vs 2003 – 2018

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

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

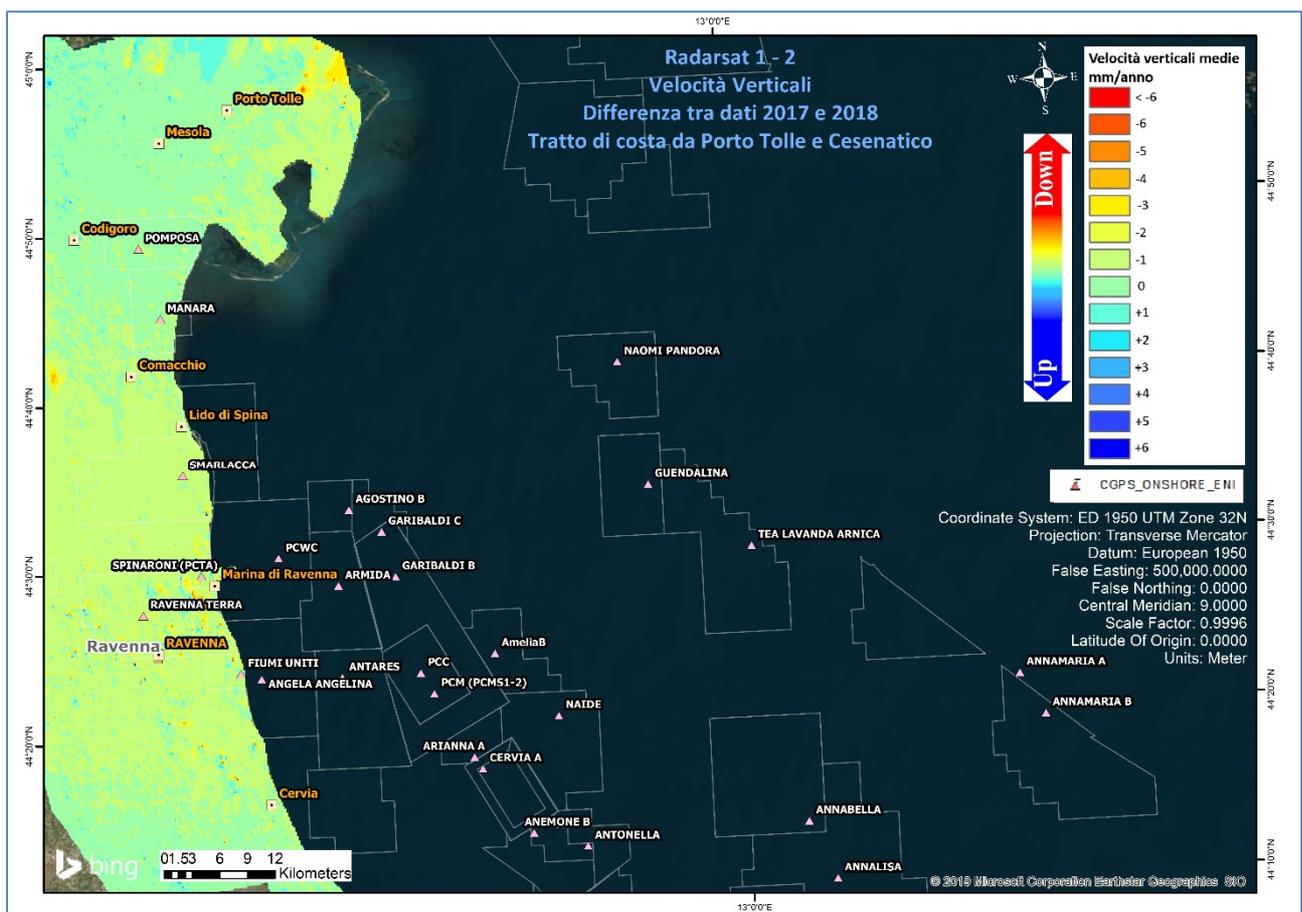


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

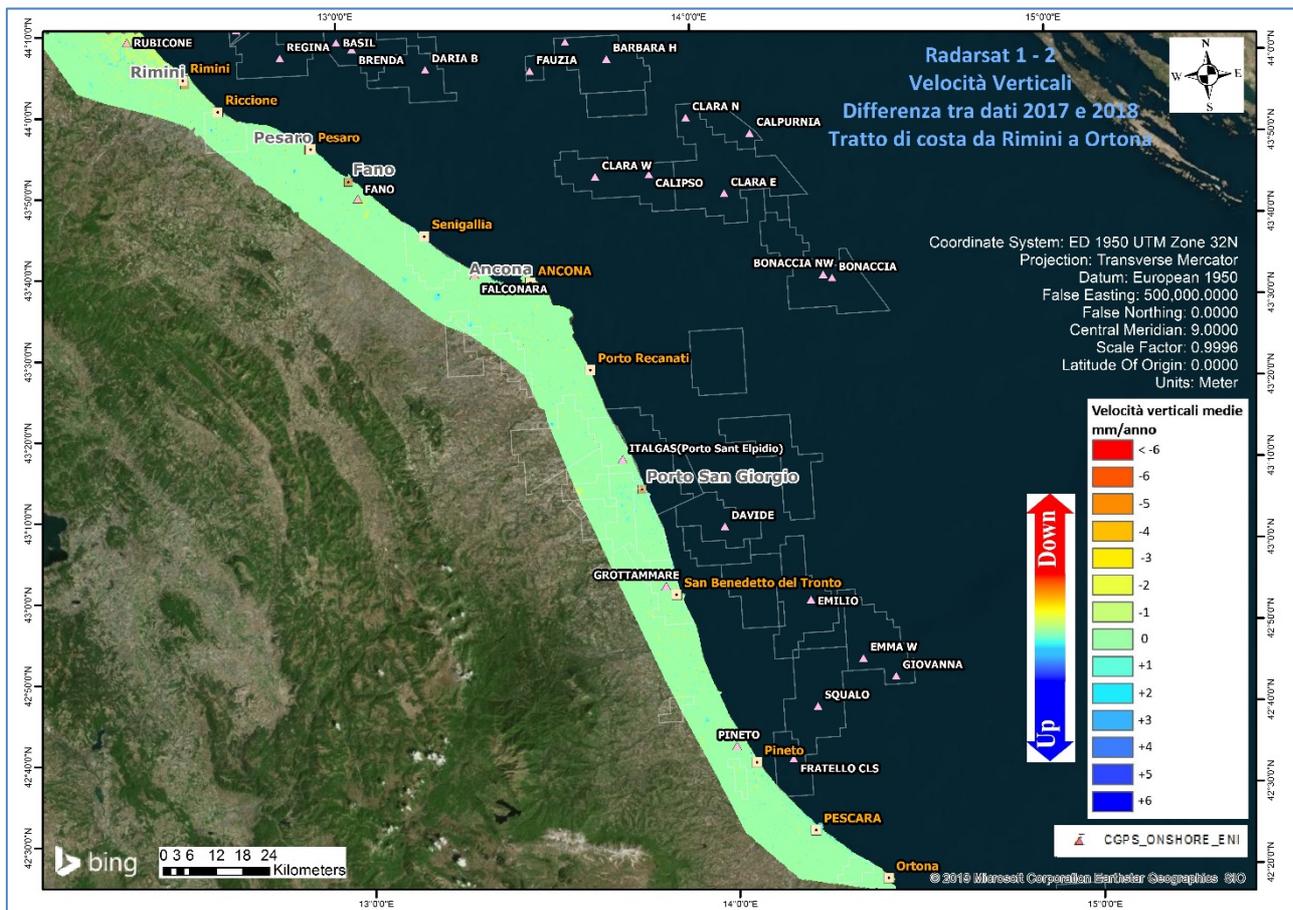


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

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

La tecnologia interferometrica PSP-DIFSAR sviluppata da Telespazio/e-GEOS (<http://www.telespazio.it> / <http://www.e-geos.it>) è una tecnica d’interferometria differenziale SAR di tipo Persistent Scatterer Interferometry (PSI) che utilizza una procedura algoritmica proprietaria per l’individuazione e l’analisi dei Persistent Scatterer (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare movimenti lenti del terreno dovuti a frane, subsidenza, fenomeni vulcanici e sismici (Costantini et al., 2005). I PS corrispondono generalmente ad elementi al suolo, come manufatti (ad esempio, parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici in genere) oppure corpi naturali (ad esempio, rocce esposte) che si distinguono dagli altri, presenti nell’area esaminata, per il fatto di possedere

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

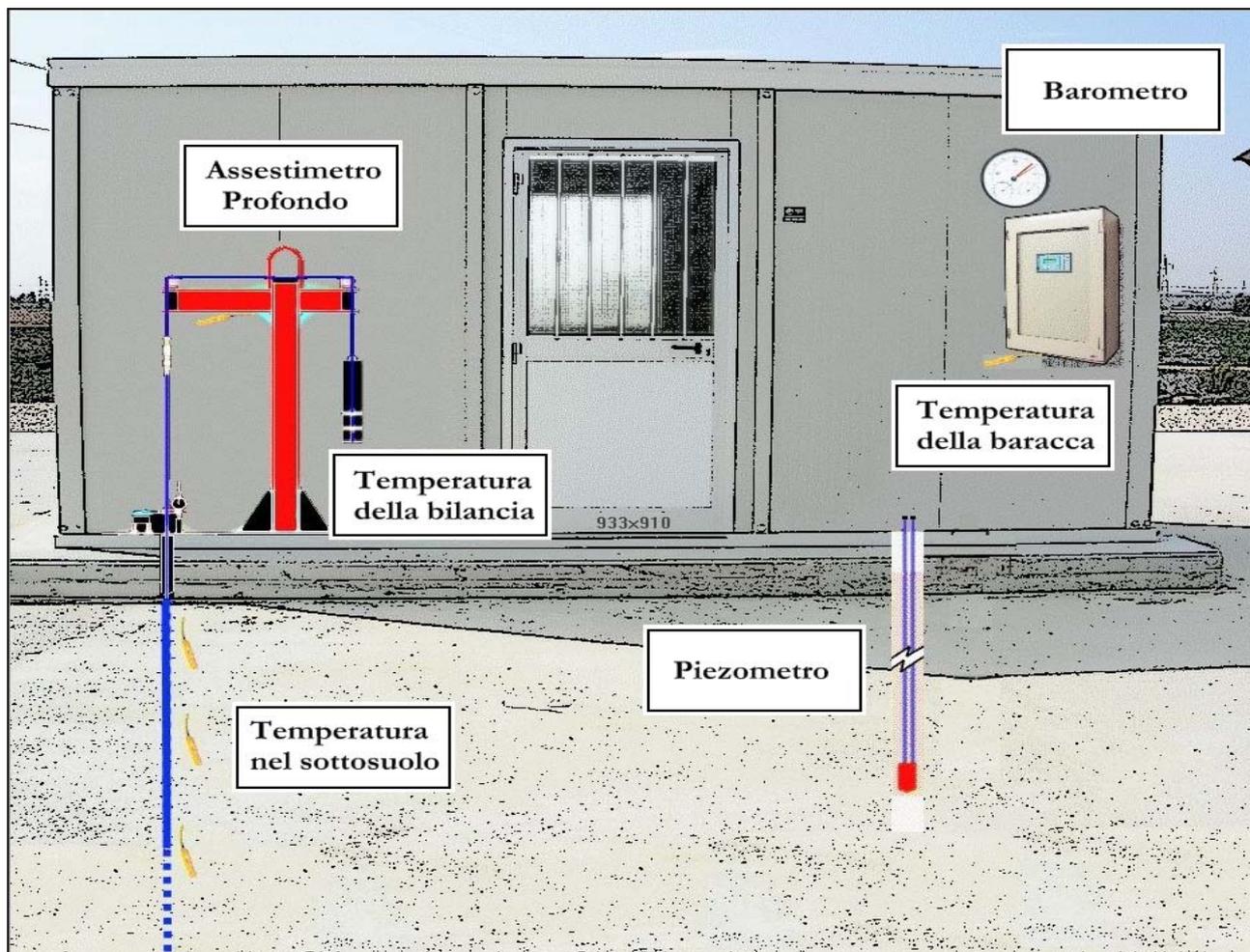


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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

Località'	Pozzo	Strumentazione	Profondità' (da P.C.)	Data d'installazione
Smarlacca		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Assestimetro superficiale	30 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
Spinaroni		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
Fiumi Uniti		Assestimetro profondo	372.85 m	Set. 1994
		Assestimetro superficiale	224.2 m	Set. 1994
		Piezometro profondo	360 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro intermedio	243 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro superficiale	148 m (disattivato)	Set. 1994
	PS-1	Piezometro tubo aperto	10.5 m	Dic. 2011
	PS-2	Piezometro tubo aperto	30.5 m	Dic. 2011
	PP-1	Piezometro tubo aperto	373.5 m	Dic. 2011
	PP-2	Piezometro tubo aperto	257 m	Dic. 2011
	PP-3	Piezometro tubo aperto	163 m	Dic. 2011

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 Smarlacca (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°35'40.00"N e 12°14'49.44"E.

La strumentazione è costituita da:

- assestimetro profondo - quota bottom 336 m da p.c.
- assestimetro superficiale – quota bottom 30 m da p.c.
- piezometro- quota cella 150.8 m da p.c.

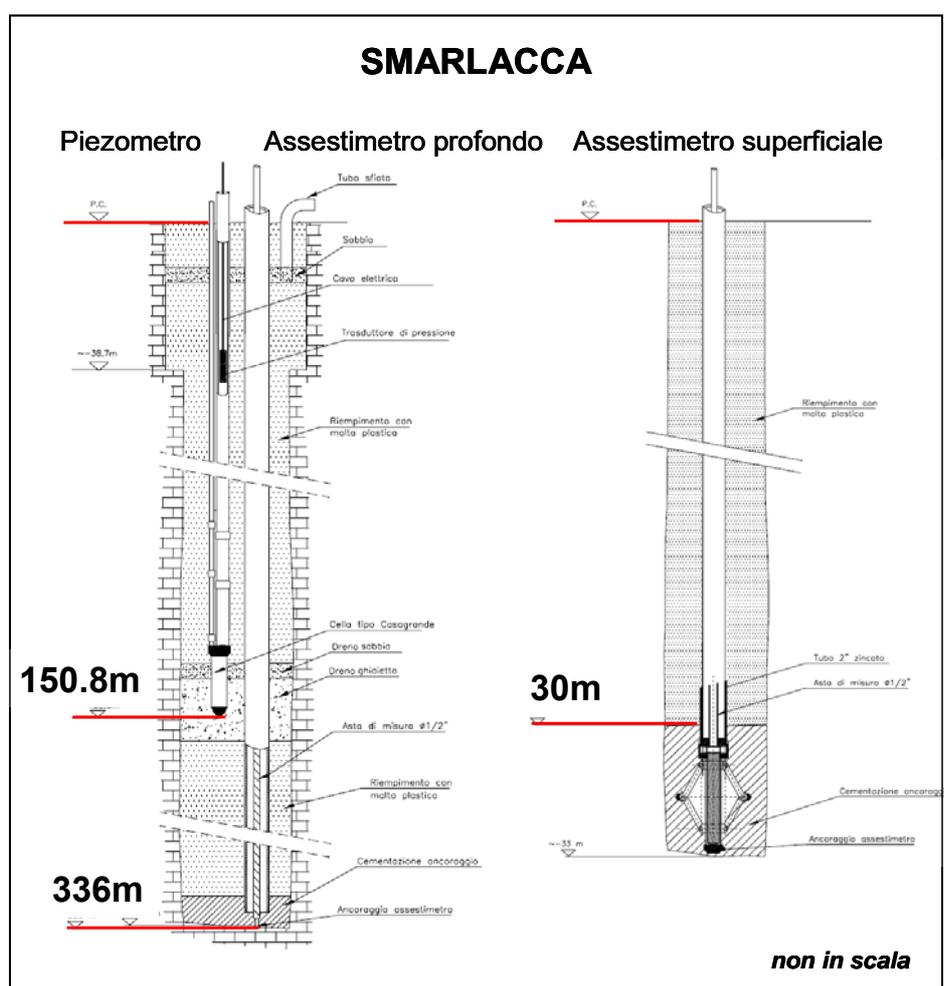


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Smarlacca

Le attrezzature installate (Figura 3B) sono costituite principalmente da una doppia verticale assestimetrica, ovvero un assestimetro profondo (334.15 metri d'asta di misura) e uno superficiale (29.5 metri d'asta di misura). La loro messa in opera è stata fatta nel periodo 15 luglio 1997 - 20 ottobre 1997; il sistema è poi stato completato nel novembre 1997 e collaudato in

data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori di misura (“misura di zero”).

All’interno del pozzetto assestimetrico è stato installato anche un piezometro Casagrande con la cella porosa posta alla profondità di 150.80 m dal piano campagna (p.c.).

L’unità d’acquisizione dati è stata impostata con la frequenza di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel periodo settembre 2003 – ottobre 2003 si sono persi dei dati per un guasto all’apparecchiatura di misura. A fine agosto del 2008 si è spurgato il piezometro che dopo l’intervento è stato ritenuto funzionante. Nell’ottobre del 2012, perdurando le registrazioni di valori anomali nei due tubi della cella Casagrande, si è fatto un nuovo intervento di pulizia al termine del quale lo strumento è stato giudicato non più in grado di fornire misure attendibili e, pertanto, non più funzionante.

Da inizio agosto 2017 e fino a inizio luglio 2018 l’acquisizione dati si è interrotta a causa di infiltrazioni nella copertura della struttura di ricovero delle apparecchiature di registrazione e raccolta dati, che sono state danneggiate. L’apparecchiatura è stata sostituita e la registrazione dei dati è ripresa il 10 luglio 2018.

L’ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali e taratura di tutti i sensori è stata fatta in luglio e ottobre 2018.

Analisi dei dati assestimetrici

L’assestimetro più profondo (336 m) misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 334.15 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale (30 m) a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 29.5 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati 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 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell’assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Nel periodo luglio - settembre 2003, si osserva nell’andamento del grafico dell’assestimetro profondo un salto (corrispondente a una compattazione) di 2.7 mm in un intervallo di 72 giorni; tale evento compare, anche se in misura minore, nel grafico dell’assestimetro superficiale

(Figura 4B). Anche se per tale periodo mancano i dati registrati per un guasto al sistema d'acquisizione, tale salto è confermato anche dalle misure effettuate con il comparatore meccanico durante i sopralluoghi per le manutenzioni ordinarie. Si tratta di un comportamento anomalo se rapportato con gli andamenti precedenti e successivi a detto periodo di osservazione. Il grafico storico mostra, infatti, una compattazione a velocità più o meno costante in tutti i periodi dell'anno, tranne che nel luglio-settembre 2003 in cui il fenomeno ha avuto un'accelerazione. Una compattazione nello stesso periodo è comunque vista anche dal CGPS: nel grafico di confronto (Figura 6B) le due curve mostrano le medesime modulazioni nello stesso arco di tempo. L'estate del 2003 è stata caratterizzata da temperature atmosferiche molto elevate e assenza di precipitazioni piovose, condizioni che potrebbero aver favorito una compattazione superficiale maggiore.

Dopo questo periodo gli assestimetri sono tornati a registrare il solito trend a velocità costante. Per quanto riguarda i termometri installati lungo la verticale assestimetrica, si segnala un guasto al sensore posto a quota -4 metri con interruzione delle misure da marzo 2013.

Le registrazioni di entrambi gli assestimetri (superficiale e profondo) mostrano lo stesso trend di compattazione ed espansione del terreno con una correlazione molto elevata fra i rispettivi andamenti anche se, le velocità medie di compattazione (Figura 4B) sono risultate rispettivamente di circa 0.25 mm/a (foro superficiale) e circa 1 mm/a (foro profondo).

In particolare, per quanto riguarda la curva di compattazione registrata dall'assestimetro profondo, si può osservare che, anche se la relativa velocità media calcolata tutta la serie temporale è di circa 1 mm/a, essa presenta un andamento più articolato nel tempo. Infatti, verso l'inizio del 2012 tale velocità di compattazione si dimezza, portandosi a circa 0.5 mm/a (Figura 5B), forse per effetto di un minor emungimento delle falde più profonde. Quest'ultima ipotesi è supportata dalla constatazione che la maggior parte della compattazione misurata si verifica in una porzione di terreno compresa tra la base dell'assestimetro superficiale e la base di quello profondo per uno spessore complessivo di circa 300 m (l'assestimetro superficiale registra una compattazione minima, pari a poco più di 6 mm totali in oltre 20 anni: 0,3mm/a). In prossimità della stazione assestimetrica è stato installato 4 anni più tardi anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare in quella zona una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a circa -6.3 mm/a.

Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono

però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi di quelli monitorati con la stazione assestimetrica (> 336 m). Il CGPS infatti nei quasi 18 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 11 cm mentre invece l'assestimetro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 2cm.

In Figura 6B è riportato il confronto fra le misure assestimetriche (sono riportate solo quelle registrate dalla strumentazione più profonda) e quelle CGPS. Il grafico allegato mostra una buona correlazione tra entrambe le curve, che riflettono bene gli eventi stagionali.

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 con quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

Analisi dei dati piezometrici

Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestimetro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.

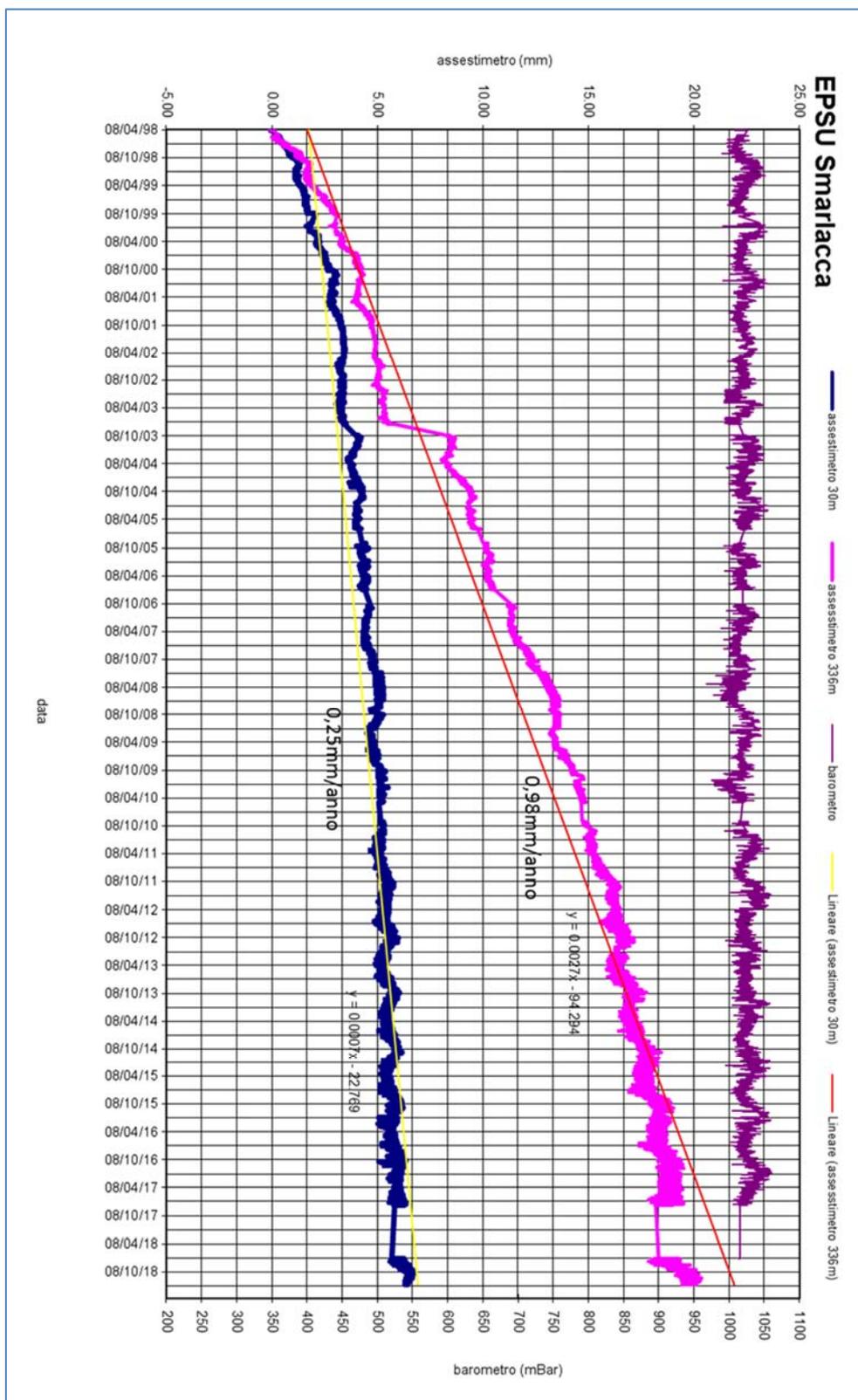


Figura 4B - Serie storica delle misure assestimentriche e barometriche nella stazione EPSU di Smarlacca

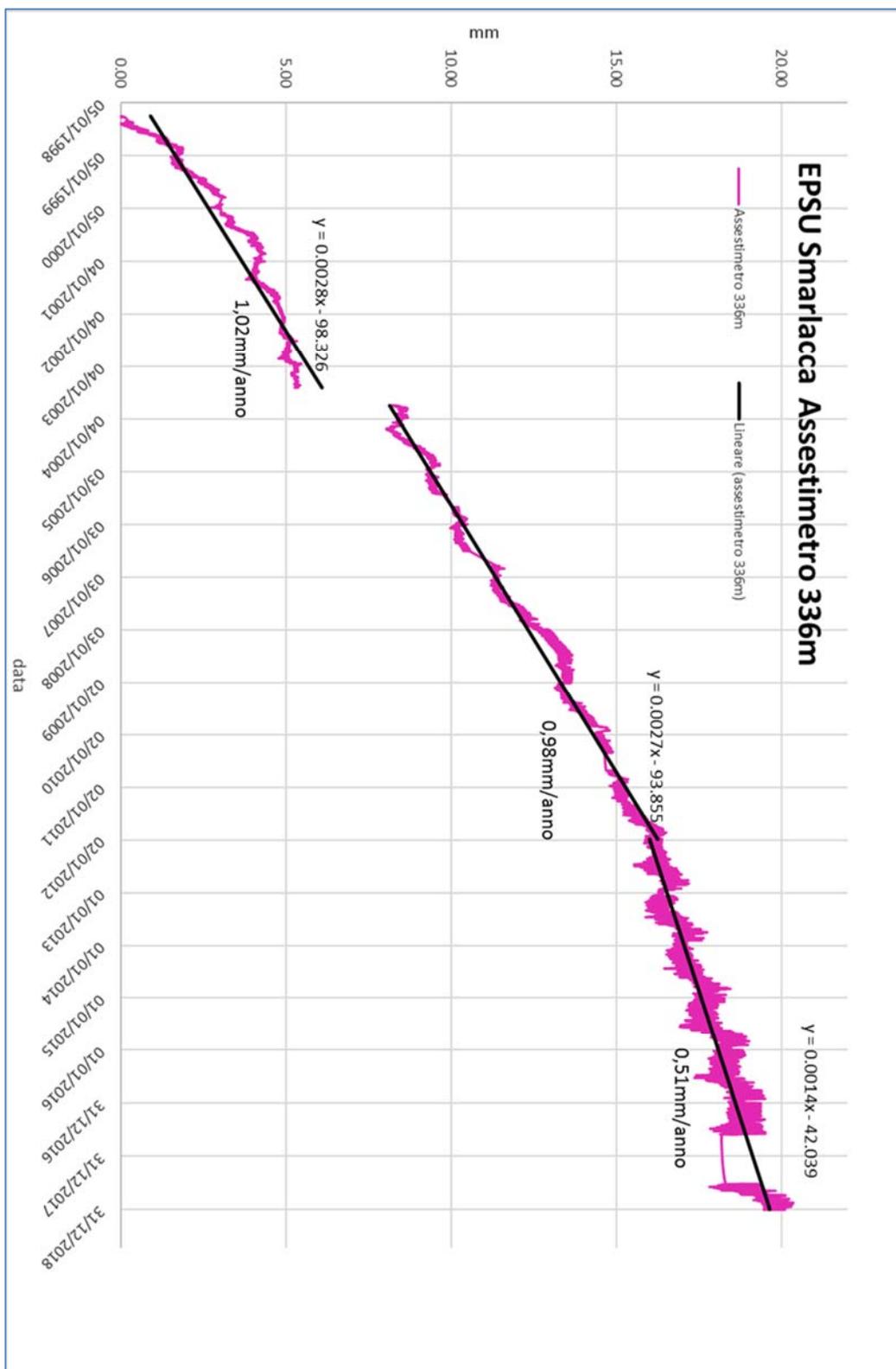


Figura 5B - Curva di compattazione dell'assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca

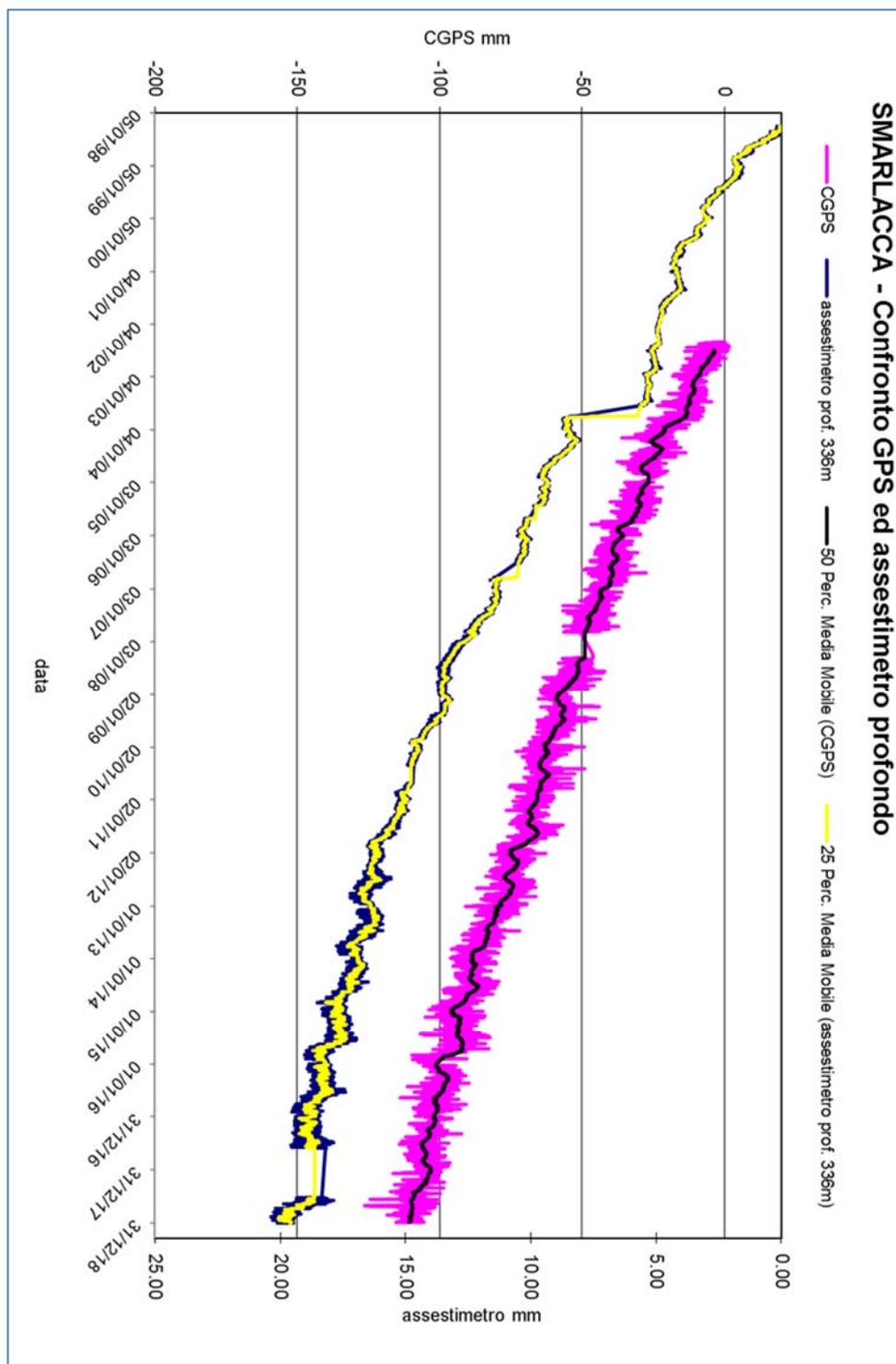


Figura 6B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca)

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 Spinaroni - (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°29'41.27"N e 12°16'01.27"E. La strumentazione è costituita da:

- assestimetro - quota bottom 336 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella 150.8 m da p.c.

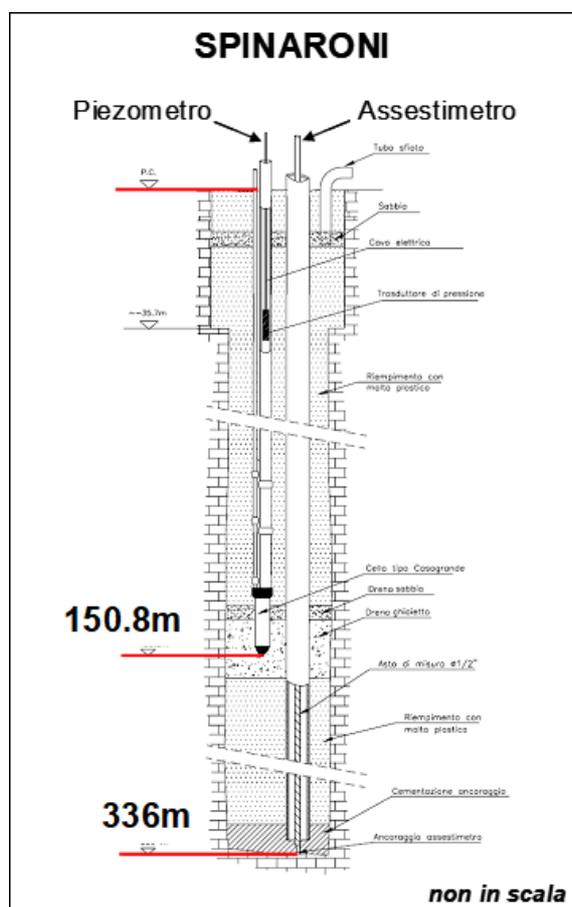


Figura 7B - Schema della stazione EPSU di Spinaroni

Le attrezzature installate (Figura 7B) sono costituite principalmente da una verticale assestimetrica e un piezometro, che sono stati messi in opera nel periodo 15 luglio 1997 - 20 settembre 1997. Il relativo sistema di misura è stato poi completato nel novembre 1997 e collaudato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori ("misura di zero").

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni

6 ore. Di questa stazione si sono persi alcuni mesi di dati (da settembre 2001 ad aprile 2002) a causa del furto del pannello solare installato per l'alimentazione del sistema. Il ripristino è stato fatto nel mese di aprile 2002. Nel periodo gennaio 2003 – marzo 2003 si è avuto un blackout per un guasto all'apparecchiatura d'acquisizione dati. Nell'agosto 2007 si è di nuovo verificato il furto del pannello solare con la conseguente perdita delle misure nel periodo 14 agosto - 5 ottobre 2007.

Dall'inizio di dicembre 2005 il sensore di pressione del piezometro ha iniziato a fornire valori anomali per cui si è deciso d'eseguire misure dirette del livello della falda. A tale scopo si è impiegato un freatimetro con il quale si è accertato che la quota raggiunta dall'acqua all'interno del tubo piezometrico era pari a -5.22 m dal piano campagna (p.c.).

In data 31 gennaio 2006 è stato sostituito definitivamente il trasduttore di pressione nel tubo piezometrico, ponendolo alla profondità di 20 metri rispetto al piano campagna.

A fine agosto 2008 si è spurgato il piezometro e al 30 settembre è stata fatta una videoispezione. A seguito di tale controllo lo strumento è stato considerato non attendibile per una probabile rottura del tubo di diametro più piccolo ($\varnothing \frac{1}{2}$ "). Gli interventi sul piezometro hanno causato la perdita di 14 giorni di misure assestometriche (dal 30 settembre al 14 ottobre 2008). Il giorno 14 ottobre si è ritarato il trasduttore di spostamento, posizionandolo a 1.8 mm rispetto alla misura del 30 settembre. Di questo riposizionamento si è tenuto conto nell'elaborazione dei dati.

A fine 2014 e nel periodo marzo - maggio 2015 si sono verificate diverse mancate registrazioni di dati per guasti dell'unità d'acquisizione, che è stata definitivamente sostituita nel maggio 2015. Si è, però, accertato che questa perdita di dati non ha avuto influenza sulla significatività della serie storica registrata. Nel 2018 la registrazione dei dati è stata regolare.

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

Analisi dei dati assestometrici

L'assestometro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 336 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati 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

dell'8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. 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.

In data 28 luglio 2004 è stata ripresa di 25,0 mm la corsa del trasduttore di spostamento, poiché il sensore era troppo vicino al fondo scala. Nell'elaborazione delle misure è stato tenuto conto di tale variazione aggiungendo un offset della stessa entità alle misure. Come già detto, analogo intervento è stato poi fatto in data 14 ottobre 2008.

Nel grafico allegato (Figura 8B) si nota un comportamento alquanto anomalo dello strumento se rapportato alla sua storia precedente che ha sempre avuto un trend in crescita. Nell'ottobre 2003, infatti, l'assestometro ha registrato un repentino sollevamento del piano campagna rispetto al punto profondo (4 mm in 5 giorni), in concomitanza con un abbassamento della falda di circa 40 – 50 cm. Dopo tale periodo (ca. fine ottobre 2003) è ripresa la compattazione del terreno, anche se, per circa 6 mesi, con un trend più veloce di quello del periodo precedente l'anomalia sopracitata. Dopo la metà del 2004 il trend di compattazione è tornato ad avere lo stesso andamento registrato nel periodo antecedente al 10/2003. Non sono state chiarite le ragioni di tale anomalia.

Per questa stazione si hanno a disposizione poco più di 21 anni di osservazioni (21.13 anni). In questo periodo si è registrata una compattazione totale di 49 mm corrispondente a una velocità di media annua di 2.3 mm (valore ottenuto con regressione lineare su tutta la serie temporale di registrazioni - Figura 8B). Anche in questo caso, però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestometro mostra un andamento più articolato nel tempo di quanto sia semplicemente espresso dal sopracitato valore medio. Si passa, infatti, da una velocità di circa 4.1 mm/a, registrata dall'inizio sino alla fine del 2007, a un valore che tra il 2008 e 2009 diminuisce sino a circa 0.8 mm/a (Figura 9B), Analogamente al caso di Smarlacca, tale diminuzione potrebbe essere correlata ad un minor emungimento delle falde acquifere. Nella stazione *EPSU* di Spinaroni è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo di circa - 7.5 mm/a. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestometrica), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 336 m). Il GPS infatti nei 16.66 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento

totale di circa 12.5 cm mentre invece l'assestometro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 3.8cm.

La correlazione nel tempo dell'andamento delle due curve (geodetica CGPS e assestimetrica) non è molto elevata come mostrato nel grafico allegato (Figura 10B); le misure CGPS presentano un andamento più regolare con una dinamica legata alla stagionalità. Nel periodo tra inizio ottobre 2003 sino a oltre la metà del 2004, la curva CGPS mostra, però, oscillazioni molto simili a quelle registrate dell'assestometro nello stesso periodo, avvalorando l'ipotesi che possano essere reali e non "artefatti strumentali" i movimenti "anomali" cui si è detto in precedenza.

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

Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Anche per questa stazione, analogamente a quella di Smarlacca, si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestometro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.

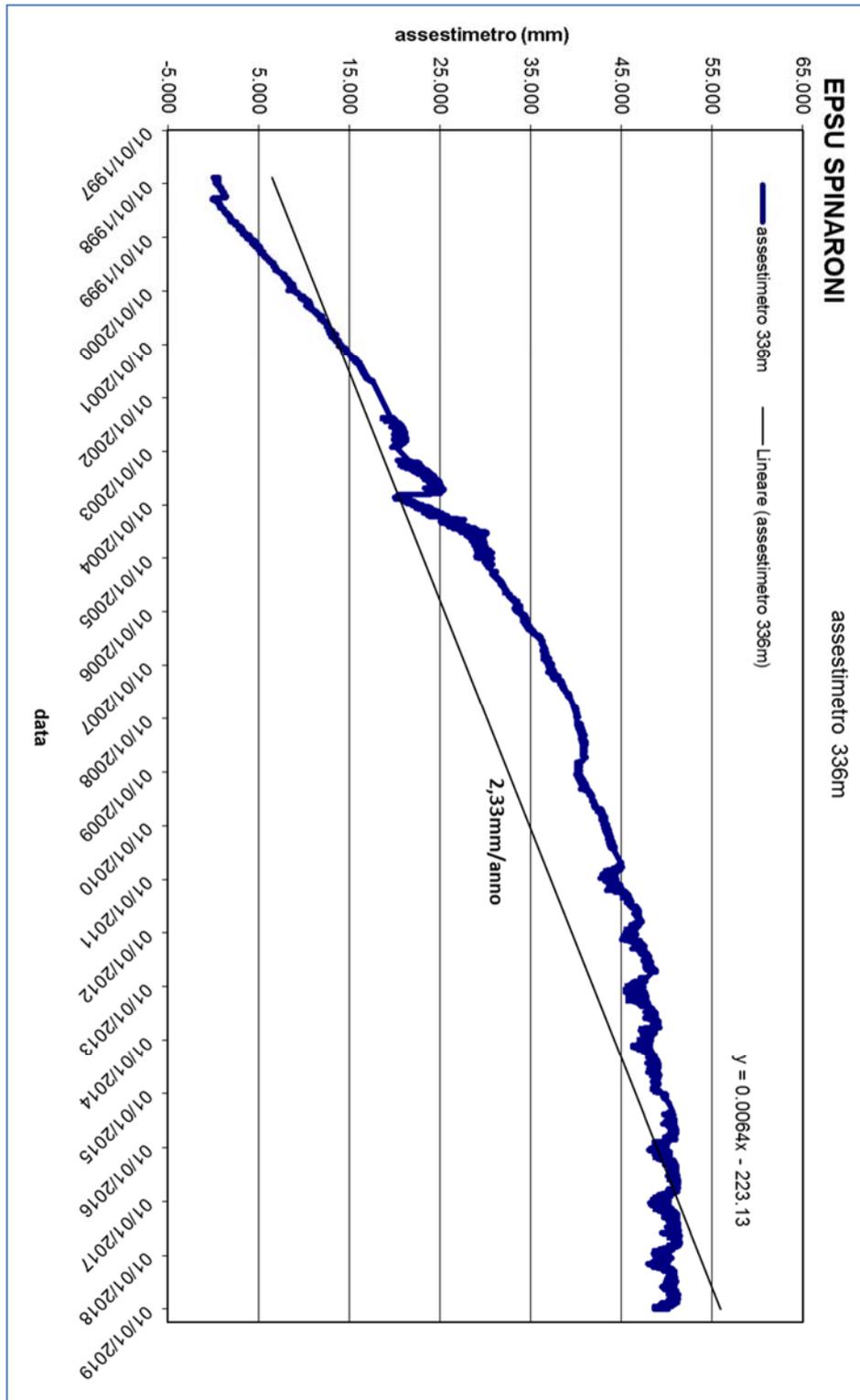


Figura 8B - Serie storica delle misure assestimetriche nella stazione EPSU di Spinaroni

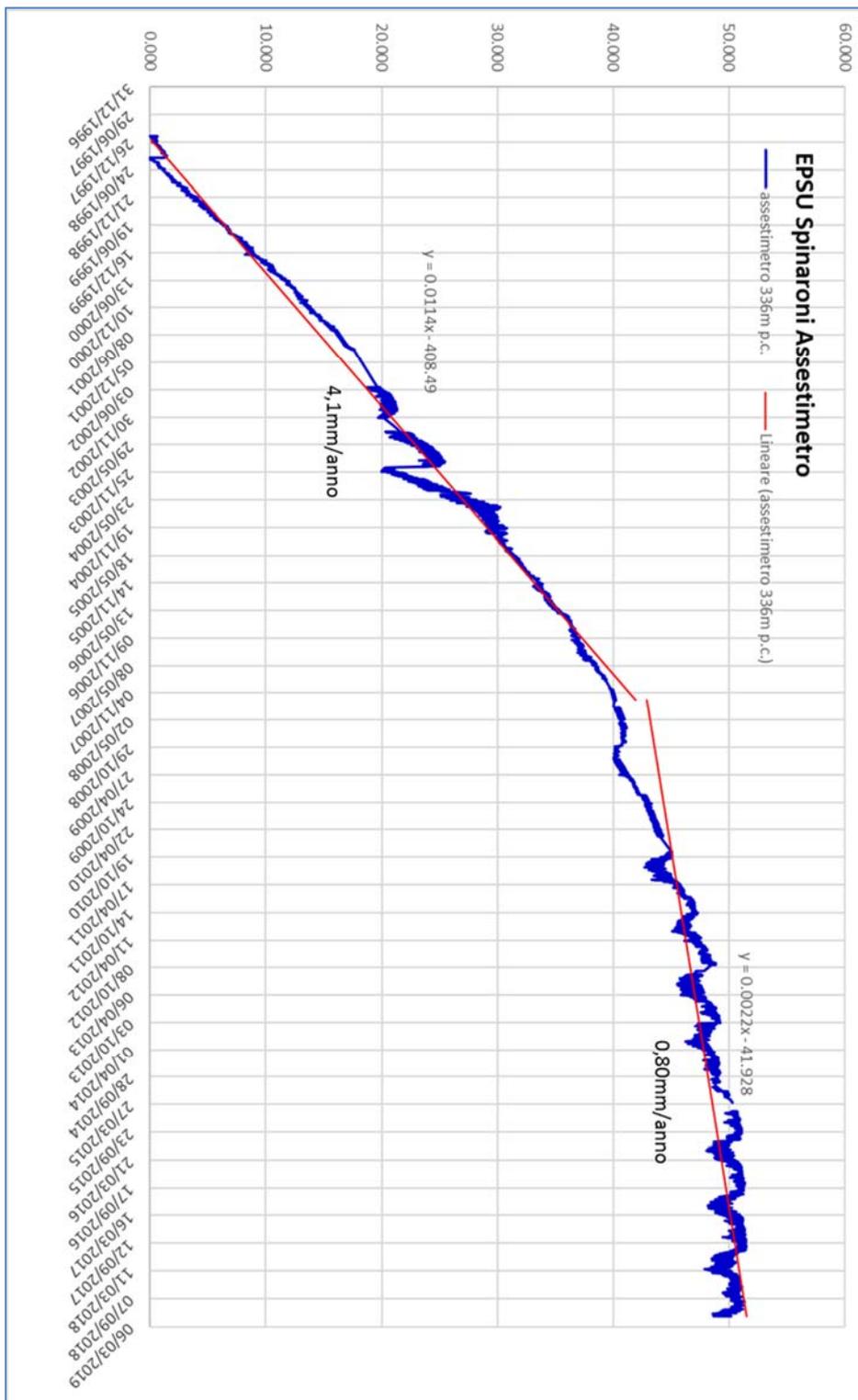


Figura 9B – Analisi di dettaglio della curva assestimetrica della stazione EPSU di Spinaroni

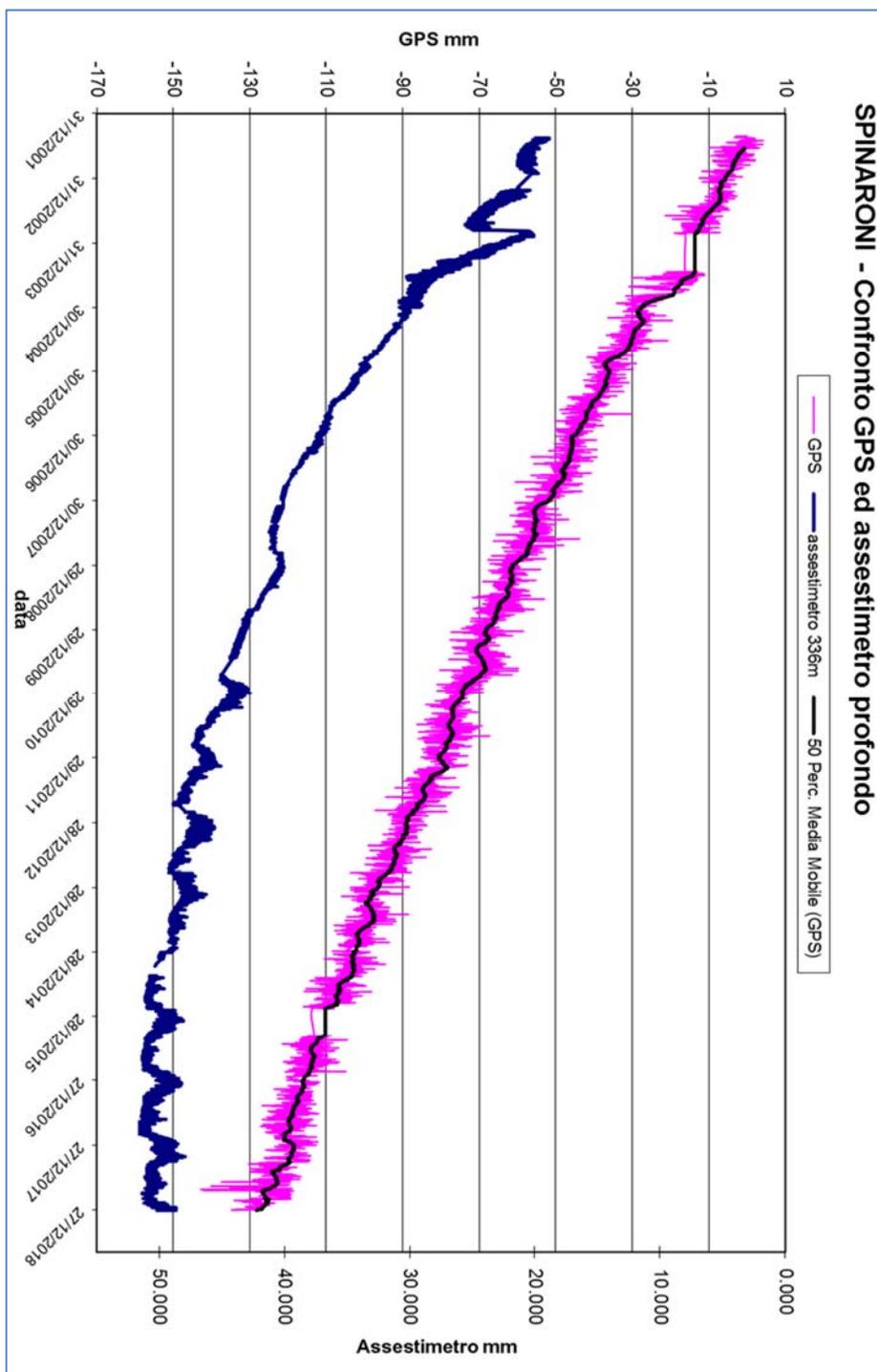


Figura 10B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assettimetro della stazione EPSU di Spinaroni)

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

Stazione **EPSU** di Fiumi Uniti (installata settembre 1994)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°23'50.09"N e 12°18'57.44"E. La strumentazione è costituita da:

- assestimetro profondo - quota bottom 372.85 m da p.c.
- assestimetro superficiale – quota bottom 224.2 m da p.c.
- Piezometro profondo a 360 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro intermedio a 243 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro superficiale a 148 m p.c. (disattivato da agosto/2011)

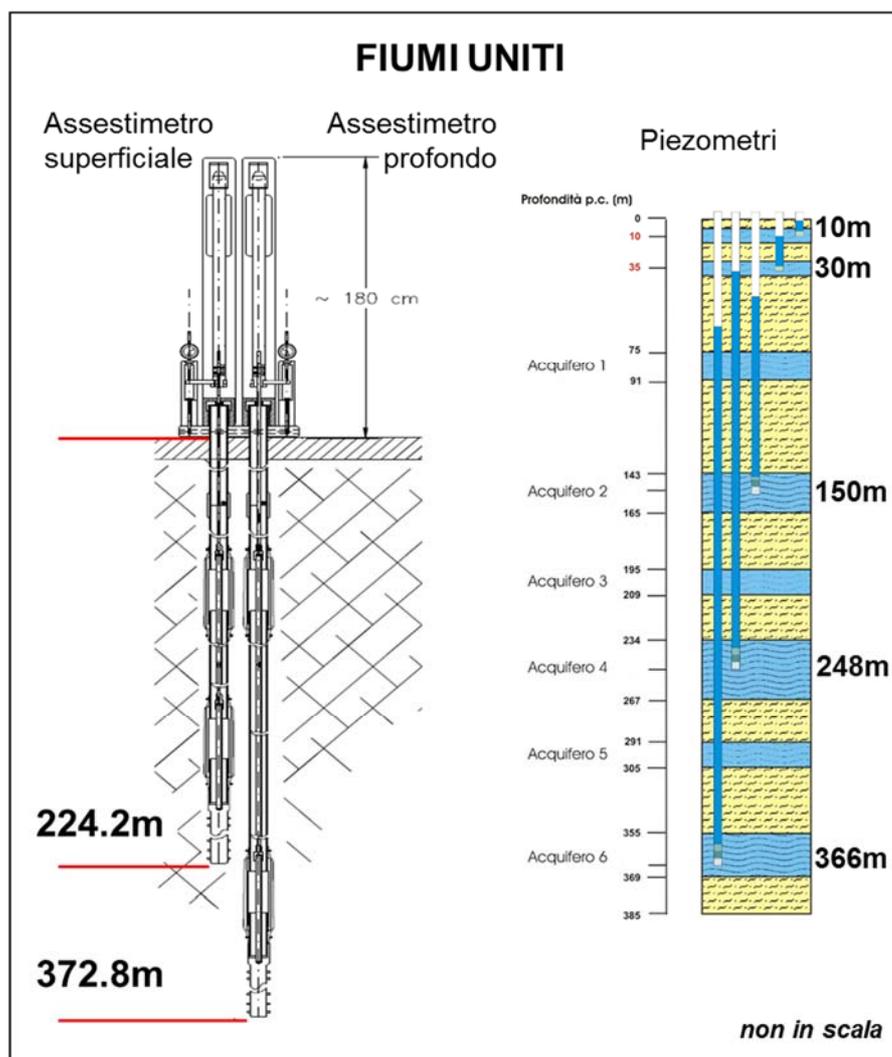


Figura 11B - Schema della stazione EPSU di Fiumi Uniti. Le profondità dei piezometri sono riferite alla quota centrale del tratto filtrante

Le principali caratteristiche della strumentazione (Figura 11B) sono attualmente costituite da una coppia di assestimetri (superficiale e profondo) messi in opera nel settembre 1994 e dai seguenti nuovi piezometri installati nel dicembre 2011:

Sigla	Profondità fondo foro (da p.c.)	Tipo Piezometro	Tratto Filtrante
PS-1	10.50	Tubo aperto	da 6.40 a 9.50 m da p.c.
PS-2	30.50	Tubo aperto	da 25.40 a 29.50 m da p.c.
PP-1	373.50	Tubo aperto	da 361.00 a 365.00 m da p.c. da 366.50 a 372.50 m da p.c.
PP-2	257.00	Tubo aperto	da 241.00 a 245.00 m da p.c. da 250.00 a 256.00 m da p.c.
PP-3	163.00	Tubo aperto	da 141.10 a 153.20 m da p.c. da 156.00 a 162.00 m da p.c.

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel luglio 2003 si è avuto il furto dei pannelli solari installati per l'alimentazione del sistema di misura, con conseguente perdita di 2 mesi di registrazioni (7 agosto 2003 - 2 ottobre 2003). Nel giugno 2004 è stata sostituita integralmente la baracca di protezione del sistema; in tale occasione è stato fatto l'allacciamento alla rete elettrica, eliminando, così, il ricorso ai pannelli solari. Nel marzo 2008 sono stati spurgati i 3 piezometri. L'operazione ha consentito d'accertare che il piezometro superficiale e quello intermedio non erano di fatto funzionanti, poiché in comunicazione idraulica tra di loro e con i filtri intasati.

Molto dubbio era anche il funzionamento del piezometro profondo.

Nel periodo 9 agosto 2010 - 8 settembre 2010 si sono perse le misure per un guasto alle apparecchiature. Analogo problema si è verificato nell'ottobre 2010. A seguito dei lavori di ripristino dei pozzetti piezometrici, a partire da metà luglio 2011, sono stati definitivamente sigillati i tre vecchi tubi piezometrici (Figura 12B). Nel dicembre 2011 sono entrati in funzione i cinque nuovi pozzi piezometrici descritti nella precedente tabella.

Da circa fine giugno 2012 sino a fine febbraio 2013 il trasduttore di pressione del piezometro superficiale a 30 m non ha funzionato correttamente registrando valori non attendibili; detto sensore è stato poi correttamente riscaldato dopo il ripristino dell'alimentazione elettrica a ottobre 2013. Si segnala la mancanza di dati di questa stazione dal 28 febbraio 2013 al 17

ottobre 2013 per un guasto alle apparecchiature di alimentazione elettrica del sistema d'acquisizione. Fino a fine luglio 2017 la registrazione dei dati è stata poi regolare. Ad agosto del 2017 si è verificato un nuovo guasto elettrico alle apparecchiature d'acquisizione, per cui sino a dicembre 2017 si sono fatte letture manuali della strumentazione piezometrica ed assestimetrica anche se con frequenza ridotta. A dicembre 2017 si sono spurgati/lavati tutti e 5 i piezometri della stazione. A tale scopo si è fatta circolare acqua a pressione e portata costanti attraverso una linea di spurgo dal basso verso l'alto, per favorire il deflusso dei sedimenti depositatisi sia nel tratto cieco che in colonna attraverso le microfessurazioni dei filtri e nei boccafori. Dopo il lavaggio di ogni singolo piezometro, sono state fatte prove di dissipazione d'energia dell'acqua immessa per la verifica del funzionamento dei tratti filtranti, seguite da prove di emungimento della falda. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione sono risultati integri e perfettamente funzionanti. L'avaria alle apparecchiature di acquisizione è perdurata anche nei primi tre mesi del 2018: dal mese di aprile l'acquisizione dei dati è stata, invece, regolare. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in giugno, ottobre e dicembre 2018.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro più profondo misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 372.85 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 224.2 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati (Figura 15B e Figura 16B) 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 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

L'assenza delle misure nel periodo compreso fra settembre 1997 e aprile 1998 è da collegare al fatto che inizialmente non era ancora in funzione il sistema di teletrasmissione dei dati. Le misure sono state fatte con continuità a partire dall'8 aprile 1998.

In data 17/10/2006 è stata ripresa la corsa dei trasduttori di spostamento, precisamente di

16.3 mm per l'assestometro profondo e di 14.4 mm per quello più superficiale. Nell'elaborazione dei dati si è tenuto in conto di queste variazioni, così da non rappresentare il "salto" nelle misure per effetto di un cambiamento di fondo scala e non di una reale variazione assestimetrica.

Per tutti circa i 24 anni di misure fatte, le due curve assestimetriche (Figura 13B e Figura 14B) mostrano andamenti molto simili, con minimi scostamenti tra loro e con un trend costante di compattazione del terreno. Ciò sembrerebbe indicare una compattazione prevalentemente superficiale, che interessa grosso modo i primi 220 m di terreno. La velocità di compattazione è di circa 2 mm/anno per entrambi gli assestimetri e per tutto l'intervallo di tempo considerato. Presso la stazione *EPSU* è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a -14.1 mm/anno. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 220 m). Il CGPS infatti nei 16.8 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 23.7 cm mentre invece l'assestometro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 3.4 cm.

Inoltre, l'esame delle curve CGPS e assestimetrica profonda non mostra particolari tratti di somiglianza, come si può osservare nel grafico allegato (Figura 17B).

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

- il confronto delle due curve è stato fatto per lo stesso periodo di osservazione (2002-2017), pur essendo la durata del monitoraggio con l'assestometro di circa 8 anni più lunga;
- 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

Come spiegato in precedenza, nella stazione sono stati posti inizialmente in opera tre piezometri verticali che, però, nel corso del tempo si sono guastati. Per un lungo periodo di tempo, le misure piezometriche utilizzate sono state solo quelle relative al piezometro più profondo, ritenuto più attendibile.

In Figura 12B è illustrato l'andamento delle curve piezometriche sino al 2011.

Da metà luglio 2011 tutti i vecchi tubi piezometrici sono stati poi definitivamente sigillati e dal 22 dicembre 2011 ad oggi si sono resi disponibili i dati dei nuovi tubi piezometrici (Figura 15B e Figura 16B). A dicembre 2017 tutti e 5 i piezometri della stazione sono stati sottoposti ad una manutenzione straordinaria consistita in spurgo e lavaggio degli stessi. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione hanno risposto in modo positivo durante l'attività di spurgo/lavaggio, risultando integri e perfettamente funzionanti. Da segnalare che, dalla sua installazione, il piezometro profondo (PP1 a 360 m di profondità) è risultato sempre in pressione, con una altezza della falda al di sopra del piano campagna, variabile tra 0.5 e 4 m.

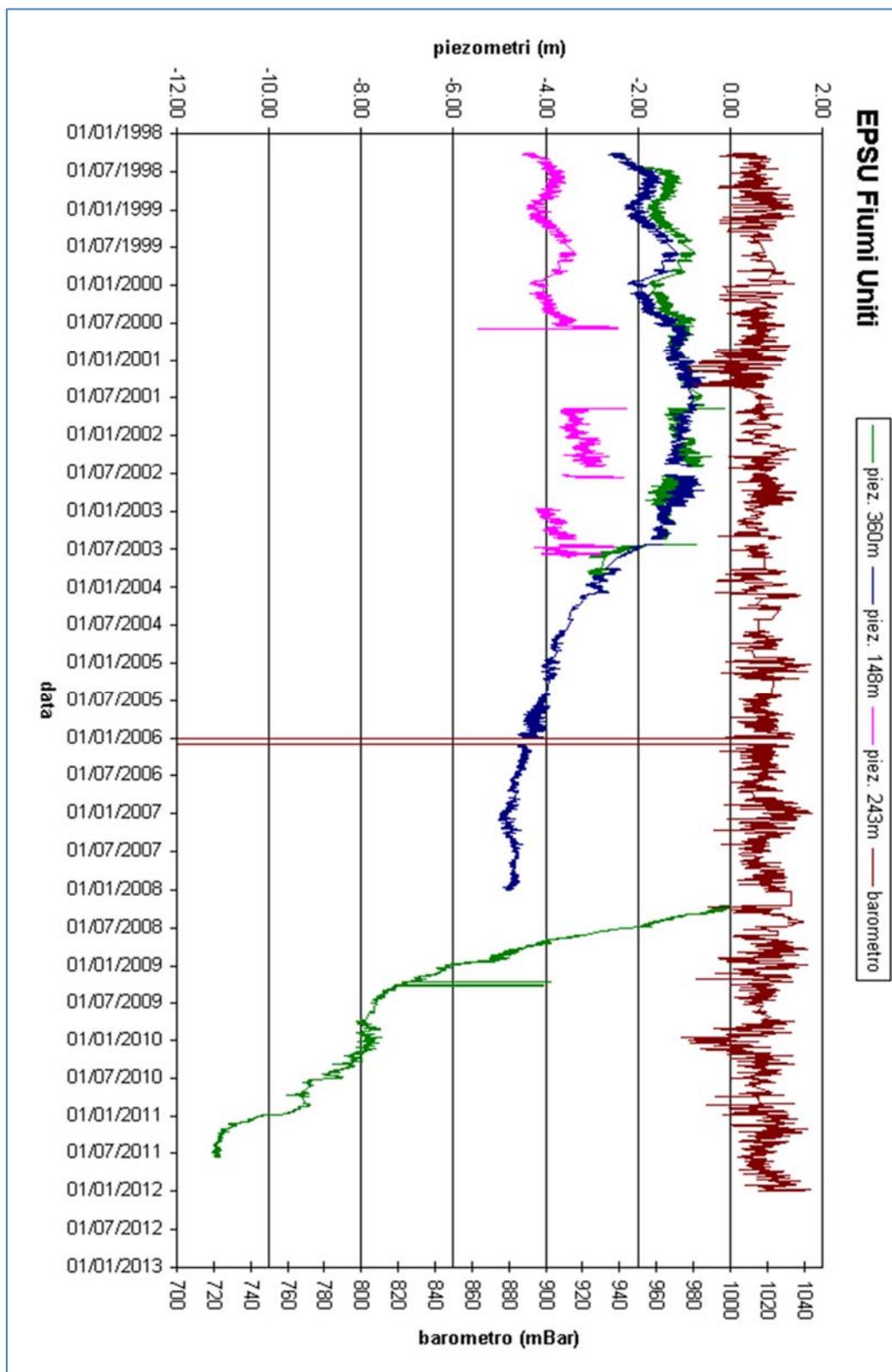


Figura 12B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure della strumentazione piezometrica-barometrica attiva sino al 2011

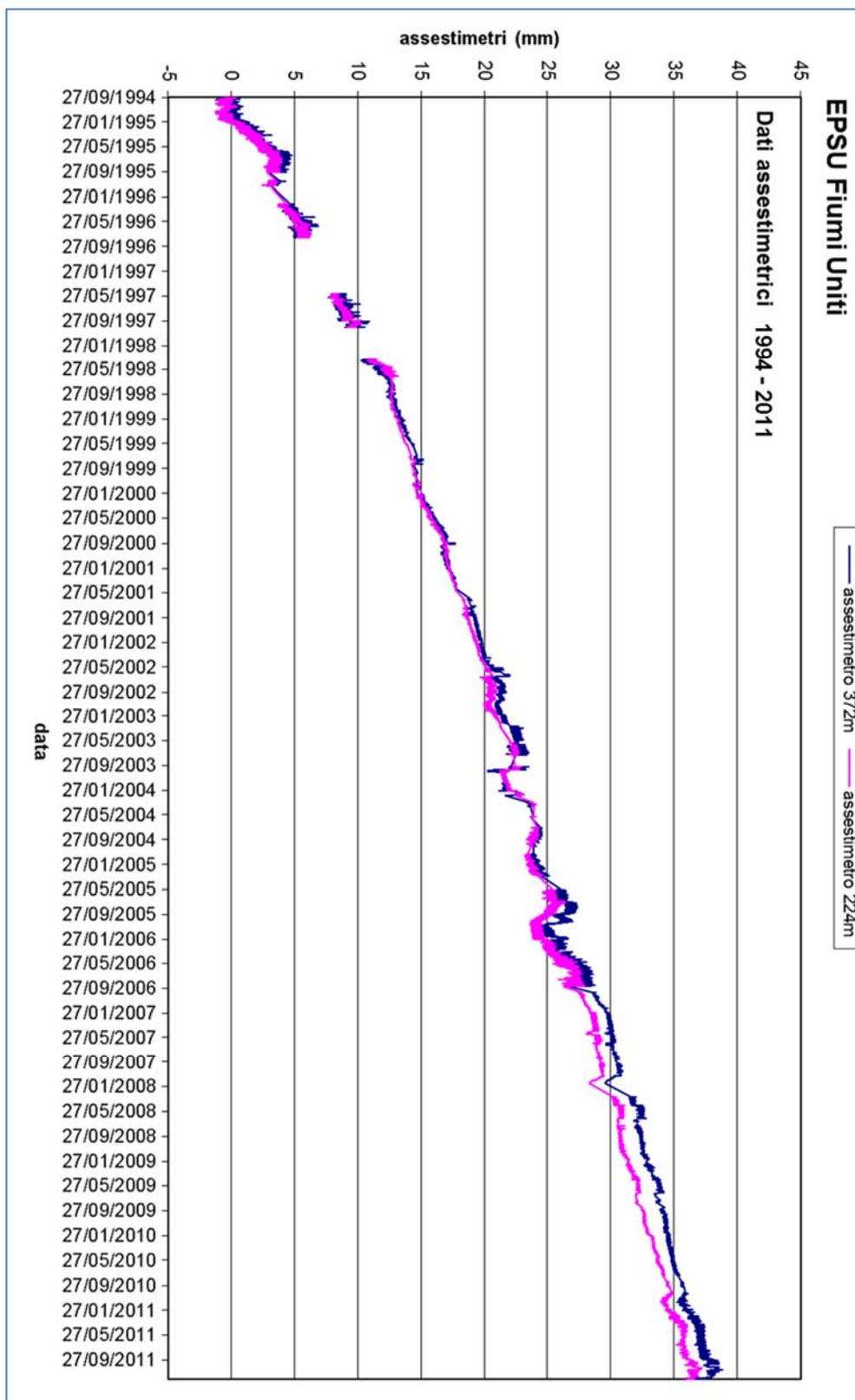


Figura 13B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 1994-2011)

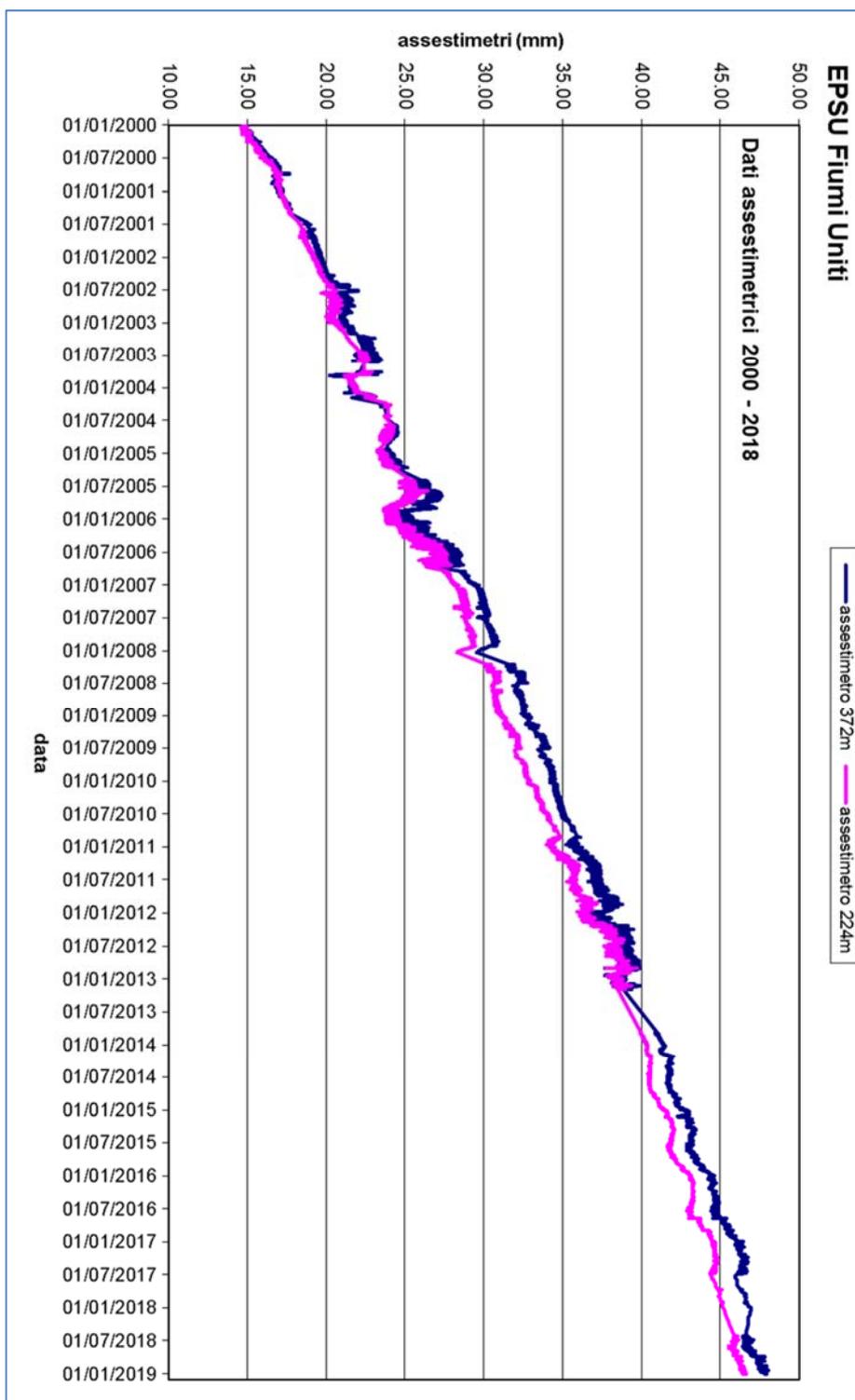


Figura 14B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 2000-2018)

Valori positivi = abbassamento; Valori negativi = sollevamento

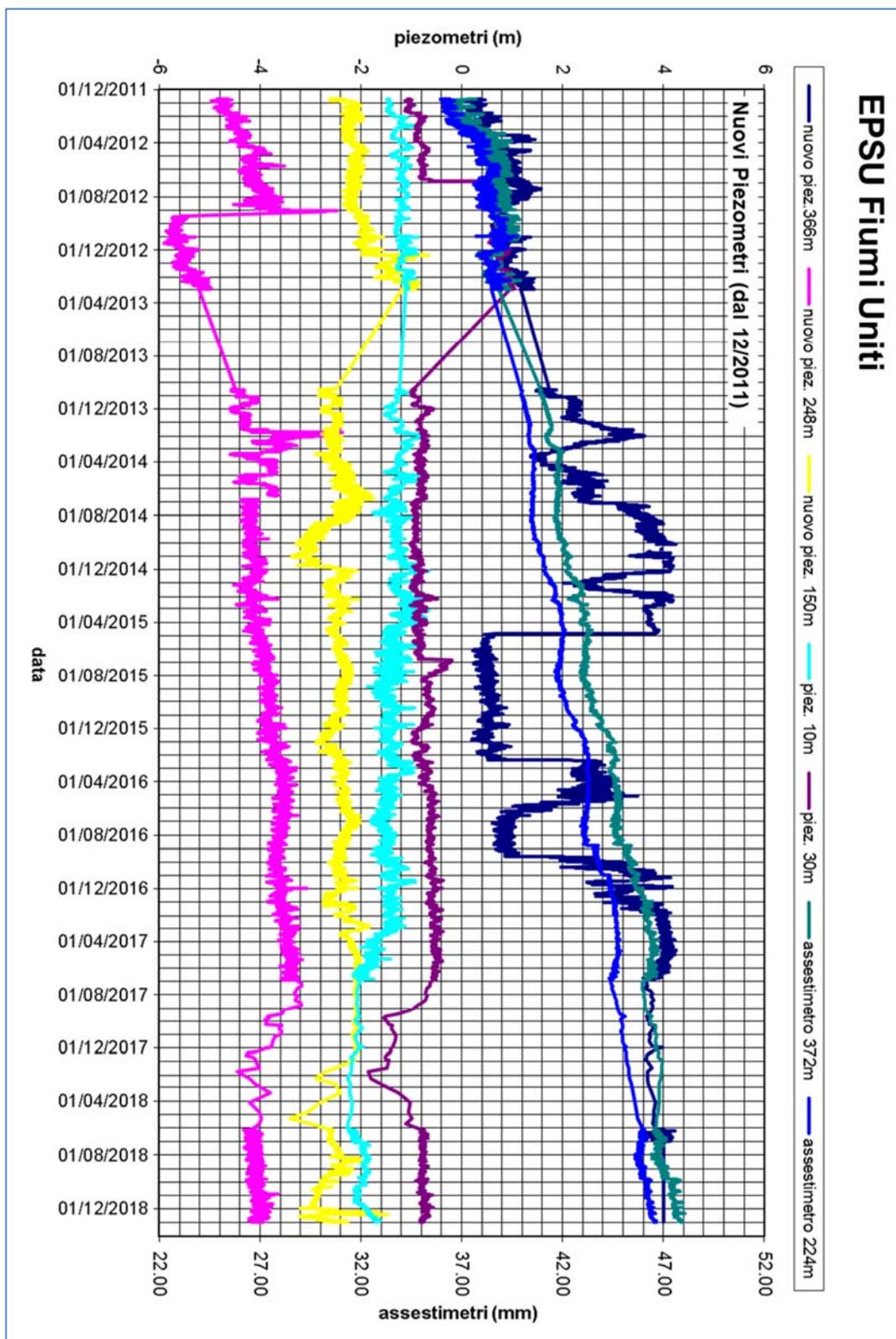


Figura 15B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e assestimetriche dal 2011 al 2018

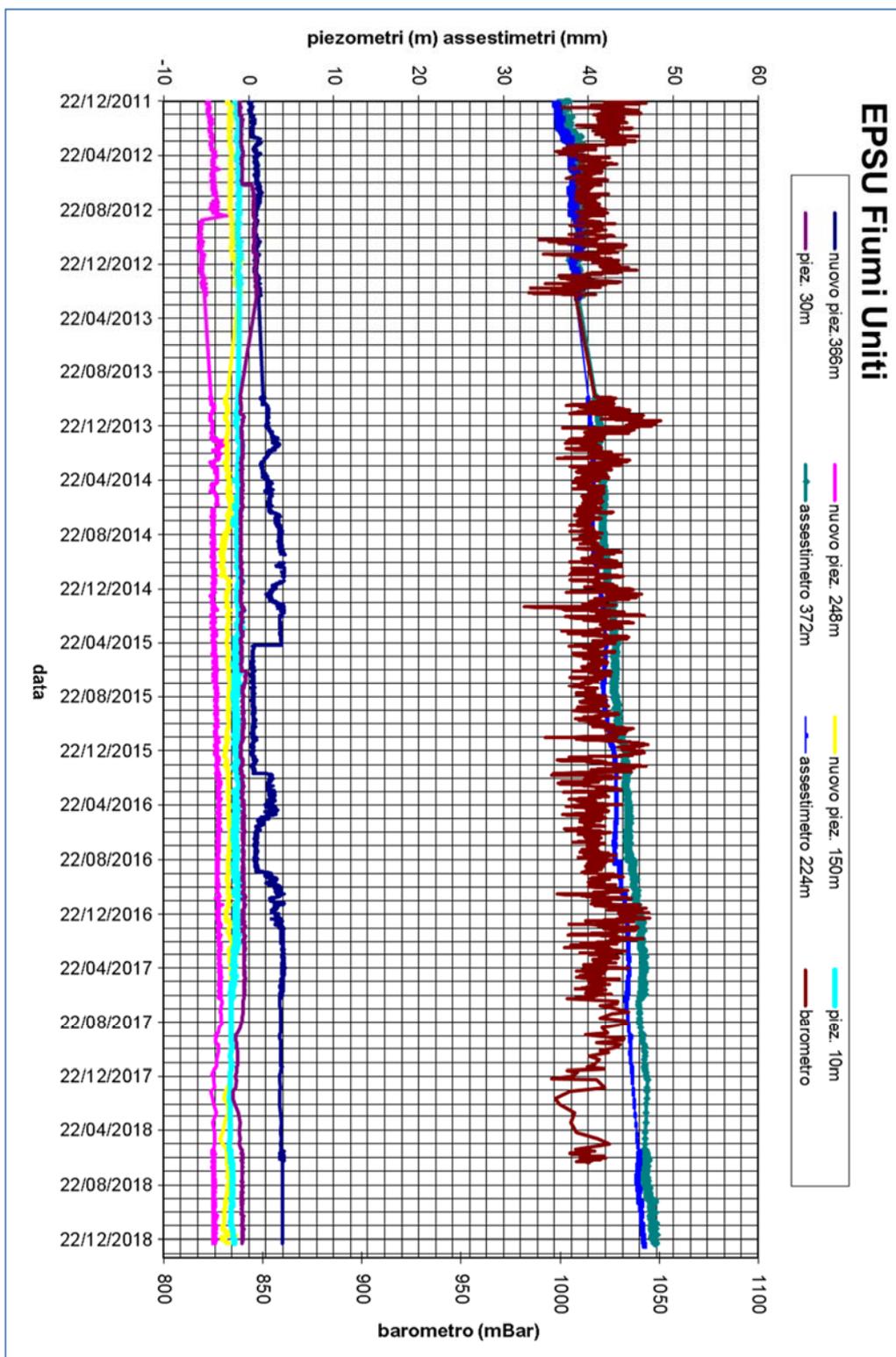


Figura 16B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e barometriche dal 2011 al 2018

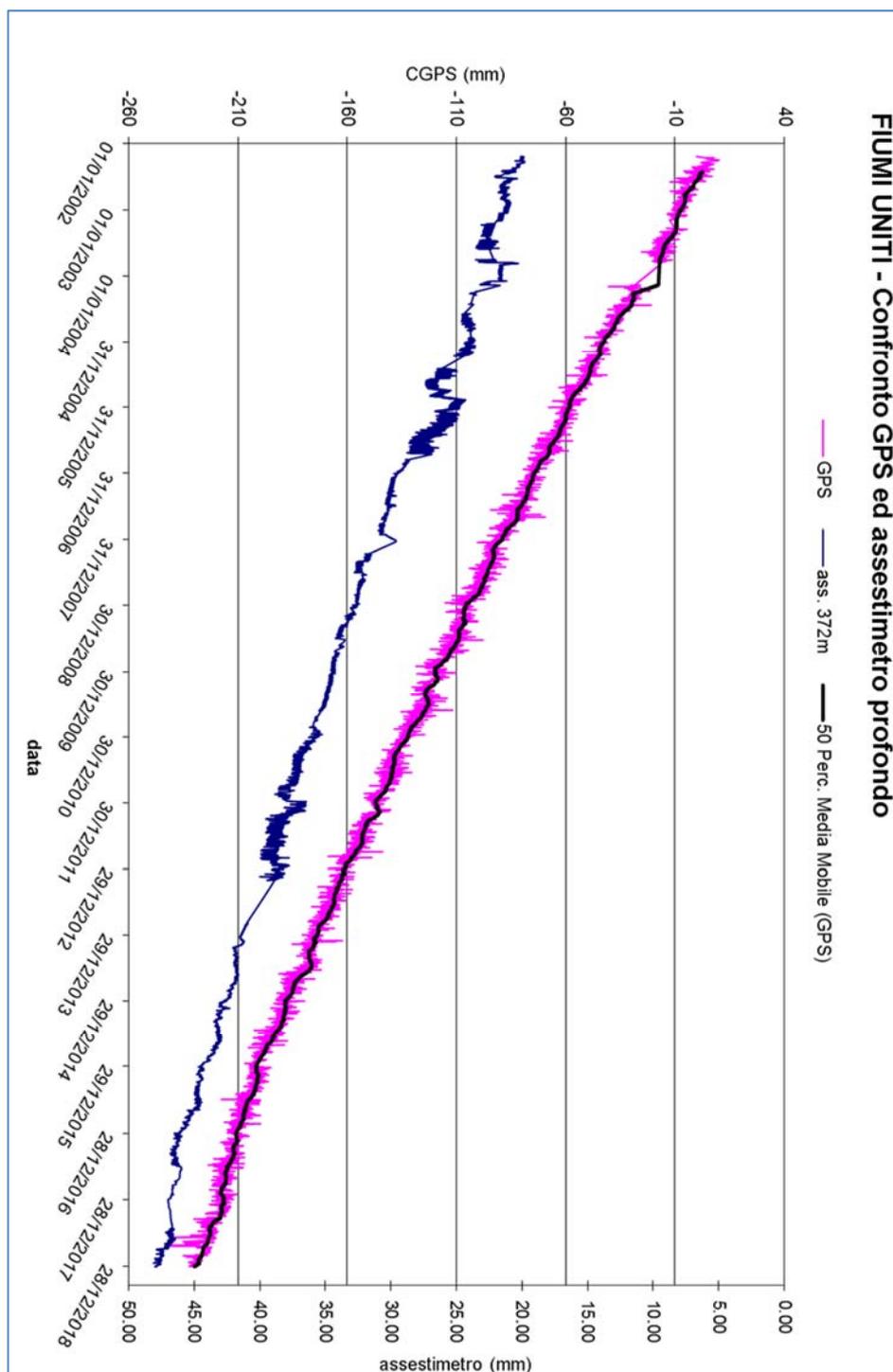


Figura 17B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (Assestimetro profondo della stazione EPSU di Fiumi Uniti)

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

In generale, i grafici allegati mostrano come per tutte e tre le stazioni *EPSU* si siano ottenuti dati di buona qualità, pur tenendo conto delle difficoltà operative incontrate in fase d'acquisizione. La lunghezza delle serie storiche registrate, la sensibilità e la qualità dei sensori utilizzati, infatti, sono tali da consentire di valutare con buona precisione l'abbassamento del piano campagna rispetto al punto di ancoraggio degli strumenti (compattazione superficiale). Anche se le misure assestometriche risentono delle escursioni - giornaliere e stagionali - di temperatura, tale fenomeno si attenua e praticamente scompare per lunghi periodi di osservazione quali quelli disponibili per le 3 *EPSU* considerate. Nell'arco degli anni di osservazione non si nota alcun effetto della variazione stagionale della temperatura. Una considerazione generale valida per le tre stazioni considerate è che la compactazione dei terreni superficiali sembra assumere un andamento costante nel tempo con una tendenza all'attenuazione. Negli ultimi 4 anni, infatti, si sono registrati valori in leggera diminuzione (da 0.1 a 0.5 mm/a) per tutti gli assestimetri, sino ad arrivare ad i valori del 31/12/2018, riportati nella tabella riassuntiva più avanti.

Smarlacca

Per la stazione di Smarlacca il periodo di osservazione è di oltre 20 anni, durante i quali l'assestometro più profondo ha registrato una compactazione media regolare anche se meno marcata rispetto a quanto misurato nelle stazioni di Spinaroni e di Fiumi Uniti. L'andamento delle misure è stato, infatti, più o meno costante nel tempo, tranne che per l'abbassamento registrato nel periodo luglio-settembre 2003; la compactazione totale è stata pari a 19.8 mm per una velocità media di abbassamento di circa 0.95 mm/a (velocità da regressione lineare 0.98 mm/a). Un analogo *trend* nelle misure si rileva anche per l'assestometro più superficiale, che, però, ha registrato una compactazione totale nettamente più ridotta: 6.4 mm complessivi, corrispondenti a circa 0.3 mm/a (0.25 mm/a da regressione lineare). L'andamento della velocità di compactazione dell'assestometro profondo mostra un andamento più modulato da quanto si potrebbe evincere dalla sola regressione lineare su tutta la serie. Si evidenziano infatti due trend di velocità distinti: uno iniziale sino alla fine del 2011 di circa 1 mm/anno ed uno degli ultimi 5 anni, con un valore di velocità di circa 0.5 mm/anno. Buona è la correlazione tra la

curva assestimetrica e quella del *CGPS*. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

Spinaroni

Per la stazione di Spinaroni si hanno a disposizione più di 21 anni di osservazioni durante i quali si è registrata una compattazione di 49 mm (circa 2.3 mm/a, stesso valore sia con regressione lineare, sia dividendo spostamento totale per anni di osservazione) con un andamento, dopo il primo periodo di assestamento, piuttosto regolare, tranne che per la brusca variazione (sollevamento del piano campagna) dell'ottobre 2003 di cui si è detto in precedenza.

Anche in questo caso però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestimetro mostra due andamenti di velocità di compattazione. Il primo sino alla fine del 2007 di circa 4.1 mm/anno; il secondo a partire approssimativamente dal 2008 ad oggi, caratterizzato da una velocità di 0.8 mm/a. La correlazione dell'andamento nel tempo delle curve *CGPS* e assestimetrica non è molto elevata; il *CGPS* sembra mostrare un trend d'abbassamento abbastanza regolare anche se influenzato dalla stagionalità. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

Fiumi Uniti

Per la stazione Fiumi Uniti si hanno a disposizione dati fin dal settembre 1994; è, quindi, possibile seguire l'evolversi della compattazione per un arco di tempo più lungo (più di 24 anni) che non nelle due stazioni sopracitate. Il valore attuale – dicembre 2018 – della compattazione totale misurata in tutti questi anni dall'assestimetro più profondo è di 47.9 mm, mentre per quello superficiale detto valore è di 46.6 mm. Ciò significa che, assumendo un trend di compattazione del terreno costante nell'arco di circa 24 anni d'osservazione, entrambi gli strumenti hanno registrato velocità media di compattazione simile e dell'ordine di circa 2 mm/anno. La compattazione però è per la maggior parte localizzata nella porzione di terreno indagata dallo strumento più superficiale (0-220 m circa).

Le registrazioni delle curve *CGPS* e assestimetrica profonda mostrano poi andamenti dei cicli di compattazione ed espansione del terreno non molto simili tra loro; la correlazione tra le due curve sembra essere più elevata negli ultimi anni di registrazione.

Nella tabella che segue sia la compattazione complessiva del terreno, sia la relativa velocità media annua sono state valutate sulla base della misura assestimetrica fatta al 31/12/2018 e di tutto il periodo (i.e. anni) di monitoraggio. In questo caso non si è fatta, quindi, alcuna regressione dei valori della curva assestimetrica. Tale procedimento potrebbe dare, pertanto, risultati molto simili ma non perfettamente uguali a quelli riportati nelle precedenti analisi dei dati assestimetrici.

Sito	Anni di osservazione	Assestimetro profondo		Assestimetro superficiale	
		Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)	Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)
Smarlacca	20.74	19.8	0.9	6.4	0.3
Spinaroni	21.13	49.00	2.3	n.i.	-
Fiumi Uniti	24.3	47.92	1.97	46.6	1.91

n.i. = non installato