

Campo di TEA-LAVANDA-ARNICA

Aggiornamento al 31/12/2016

Il campo di Tea, Lavanda e Arnica (TLA) è ubicato nell'offshore adriatico a una distanza di circa 58 km dalla costa prospiciente Ravenna, in corrispondenza di un fondale marino di circa 40 m. Tale campo ricade nella concessione di coltivazione A.C34.AG, titolarità Eni 100% (Figura 1).

| CONCESSIONE | SCADENZA | OPERATORE | TITOLARI | QUOTA | REGIONE |
|-------------|----------|-----------|----------|-------|----------------|
| A.C34.AG | 19/06/24 | Eni | Eni | 100% | Emilia-Romagna |

I livelli mineralizzati a gas dei giacimenti di Tea, di Lavanda e di Arnica sono costituiti da torbiditi sabbiose, della formazione P.to Garibaldi che si sono depositate in corrispondenza di una monoclinale regionale di età pre-pliocenica immergente verso SW. In tali livelli le sabbie, più o meno siltose e talora con sottili livelli argillosi, di genesi torbiditica, sono riconducibili a una situazione deposizionale tipo "lobo torbiditico prossimale" in brusca chiusura laterale per *onlap* contro la rampa di avanpaese.

La successione più alta della serie mineralizzata presenta una significativa variazione di facies, riferibile a una fase di sedimentazione torbiditica a minore efficienza di trasporto conseguente a una diminuzione di volume dei flussi di torbida. La successione inferiore, più marcatamente sabbiosa, presenta banchi amalgamati, talora associati a livelli di ciottoli argillosi (*clay chips*) imballati in matrice siltoso-sabbiosa. Tali strutture sono legate a fenomeni di rielaborazione di orizzonti argillosi che erano asportati dalle sovrastanti correnti di torbida, a marcata efficienza.

Il giacimento di Tea è stato scoperto nel novembre 1998 con la perforazione del pozzo esplorativo Tea 1, che è stato in seguito ripreso in side-track come Tea 1 dirA. Il pozzo è stato poi chiuso minerariamente dopo aver eseguito le prove di produzione.

La struttura mineralizzata di Tea è, di fatto, una trappola mista stratigrafico-strutturale, estesa per circa 7 km², che s'impone su un "naso" del substrato pre-pliocenico, con chiu-

| | | |
|---|--|------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 2 - of 64 |
|---|--|------------------|

sura a NW, SE e SW per pendenza e a NE per *pinch-out*. L'estensione dei principali livelli mineralizzati coincide con un evidente fenomeno di anomalia d'ampiezza sismica.

Tali livelli, appartenenti al PL3-H della parte basale della formazione P.to Garibaldi (Figura 2), sono stati denominati dall'alto verso il basso: PL3-H, PL3-H1 e PL3-H2: il loro spessore lordo varia dai circa 14 m del livello PL3-H1 ai 4 m del PL3-H.

Il giacimento di Lavanda è stato scoperto nell'ottobre 1999 dopo aver perforato il pozzo esplorativo Lavanda 1 dir, che ha trovato mineralizzato il livello PL3-F1 a una distanza di circa 1600 m in direzione SE dal pozzo Tea 1. Il pozzo è stato poi ripreso in side-track come Lavanda 1 dir A con funzione di *appraisal* e, sia pure senza l'esecuzione di prove, ha fornito utili indicazioni sull'andamento strutturale di entrambi i giacimenti. Al termine degli accertamenti minerari il pozzo è stato sospeso con tecnologia *mudline suspension*.

Il giacimento di Arnica è stato scoperto nel gennaio 2000 con la perforazione del pozzo esplorativo Arnica 1, ubicato a circa 4500 m dalla citata *mudline suspension*. Il pozzo è stato chiuso minerariamente al termine delle prove di produzione che hanno interessato il livello PL3-H3.

Il campo di Tea-Lavanda-Arnica (TLA) è stato sviluppato nel periodo febbraio 2007 - settembre 2007, perforando dalla piattaforma Tea i seguenti 4 pozzi, completati poi in doppio per un totale di 8 string:

- Lavanda 1 dir A e Tea 2dir per la coltivazione del giacimento di Tea;
- Arnica 2 dir per la coltivazione del giacimento di Arnica;
- Lavanda 2 dir per la coltivazione del giacimento di Lavanda.

Tutti i pozzi di sviluppo sono stati completati con tecnologia "*sand control*", del tipo OHGP (Open Hole Gravel Pack) nel pozzo Arnica 2 dir, e ICFP (Inside Casing Frac Pack) nei pozzi Tea 2 dir, Lavanda 1 dir A e Lavanda 2 dir.

Nel documento SIA del 4/02/02 è riportato il profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello Eclipse 3D del 10/2000).

La subsidenza massima prevista in relazione a tale profilo è valutata con un modello Geertsma semianalitico (*Eni-GEDA: giacimento di Tea, Lavanda, Arnica - modellizzazione di subsidenza - Nota tecnica - MOGI-RIGE luglio 2001*) è risultata pari a 1,8 cm (in corri-

spondenza del culmine del giacimento) dopo 7 anni dall'inizio produzione; l'estensione massima del cono di subsidenza è risultata limitata all'area complessiva dei tre giacimenti.

Allo scopo d'accertare l'esistenza d'eventuali interazioni geomeccaniche tra il campo di Tea, Lavanda e Arnica e quello di Naomi e Pandora si sono confrontati i risultati del modello semianalitico di Geertsma (2001) con quelli del modello elasto-plastico a elementi finiti Isamgeo (2003) realizzato per la previsione della subsidenza di Naomi e Pandora (*Eni-GEDA: campo di Tea, Lavanda, Arnica - nota integrativa del 27/01/03*). Come si rileva dalla Figura 3, tale confronto ha escluso ogni possibilità d'interazione fra i coni di subsidenza dei due campi.

Nel marzo del 2003 si è aggiornato il modello Eclipse di Tea, Lavanda, Arnica (*Eni-MOGRIGE - Campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell'acquifero - marzo 2003*), unificando i modelli dei tre giacimenti - originariamente distinti - sia per le zone mineralizzate che nell'acquifero onde tener conto d'eventuali interazioni idrauliche e, quindi, meglio valutare la propagazione del disturbo di pressione nell'area circostante i giacimenti stessi. La possibile subsidenza indotta dalla coltivazione è stata a sua volta valutata per l'insieme di tali giacimenti con un modello geomeccanico elasto-plastico a elementi finiti (*ISAMGEO: campi a gas di Tea, Lavanda e Arnica-modello predittivo di subsidenza - marzo 2003*).

Nel corso delle simulazioni geomeccaniche si sono altresì eseguiti test di sensitività per valutare in quale misura influiscano sulla previsione di subsidenza le scelte sia dei valori di compressibilità uniassiale C_m dei sedimenti che di permeabilità dell'acquifero, fatte sulla base di modelli statistici e geostatistici.

In particolare lo studio Isamgeo ha considerato due scenari di compressibilità C_m :

- **caso A:** si è utilizzata la legge di compressibilità proposta in letteratura da *Baù et al.*¹;
- **caso B:** si è utilizzata una stima di compressibilità derivata dall'interpretazione delle misure in situ con marker fatte nel pozzo Naomi 4D.

Per ciascuno scenario di compressibilità (casi A e B) sono stati considerati, inoltre, due

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

possibili scenari di depressurizzazione:

- **scenario “press 1”** nel quale si è assunta la permeabilità dell’acquifero pari a quella del giacimento. Tale scenario corrisponde a una maggiore depressurizzazione delle zone esterne nell’acquifero e a una minore depressurizzazione di quelle interne al giacimento per effetto della maggior spinta d’acqua, il che comporta anche un minor recupero di gas;
- **scenario “press 2”** nel quale si è assunta la permeabilità dell’acquifero pari a 1/10 rispetto a quella di giacimento sulla base di evidenze indirette di possibili fenomeni di diagenesi nei livelli ad acqua; fenomeni che nelle zone mineralizzate sarebbero, invece, inibiti dalle alte saturazioni in gas.

Sulla base delle simulazioni fatte e considerata la configurazione più probabile (**caso A** - scenario **“press 1”**), il valore di subsidenza massimo previsto al termine del periodo di coltivazione dei giacimenti è stato pari a 1,7 cm in corrispondenza della culminazione strutturale del giacimento di Tea. Tale valore si riduce a circa 1 cm a una distanza massima di 4,5 km in direzione SW dal centro del complesso dei giacimenti, ovvero a più di 50 km dalla costa.

In seguito a ulteriori approfondimenti, richiesti da MATTM, è stato assegnato al Dipartimento per i Metodi e i Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) della Facoltà d’Ingegneria dell’Università di Padova l’incarico di verificare e validare la previsione di subsidenza eseguita da Isamgeo, per conto di Eni, nel 2003.

A tale scopo DMMMSA ha fatto uno studio previsionale della subsidenza nei giacimenti in oggetto (*DMMMSA-Università di Padova: studio previsionale con modello ad elementi finiti della subsidenza attesa dalla coltivazione dei campi di Tea, Lavanda ed Arnica – novembre 2005*) basandosi sulla già citata revisione dei modelli statico e dinamico di giacimento (*Eni-MOGI-RIGE: campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell’acquifero - marzo 2003*), e prendendo in esame diverse ipotesi in merito al valore del coefficiente di compressibilità C_m dei sedimenti (per maggiori dettagli in merito si rimanda alla relazione DMMMSA).

In sintesi i risultati ottenuti da DMMMSA sono stati:

- 1) la subsidenza massima attesa si verifica all'interno dell'involuppo delle tracce dei giacimenti ed è dell'ordine di qualche centimetro a seconda della legge di compressibilità adottata. Il valore di subsidenza con lo scenario più probabile (*forecast 1 e compressibilità media*) è di 2 cm, mentre nelle condizioni più cautelative (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) è di 4,6 cm;
- 2) in ogni scenario previsto, l'isolinea di subsidenza 1 cm rimane circoscritta all'involuppo delle tracce dei giacimenti. Nella condizione più sfavorevole (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) la distanza massima raggiunta dall'isolinea 1 cm rispetto al baricentro delle tracce dei giacimenti è di circa 8 km, cioè circa 50 km dalla linea di costa e completamente a sud del parallelo passante per la foce del Po di Goro;
- 3) con lo scenario di *forecast 1*, il massimo della subsidenza attesa si verifica alla fine della produzione con un lieve rebound dopo l'abbandono del campo. Al contrario, con lo scenario di *forecast 2*, il processo di abbassamento prosegue anche in fase post-produttiva con una lieve subsidenza residua stimabile in pochi millimetri.

Lo studio eseguito dal DMMMSA di Padova ha completamente confermato, quindi, i risultati della precedente valutazione di Isamgeo, ovvero che la possibile subsidenza indotta dalla coltivazione dei campi a gas di Tea-Lavanda-Arnica secondo i programmi di produzione previsti da Eni è minima, del tutto trascurabile anche nella zona dei giacimenti e, inoltre, non interessa la fascia costiera a sud del delta del Po e il litorale ravennate.

Nel gennaio del 2010 è stato nuovamente aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica con risultati che hanno portato a un aumento del 6% delle riserve a vita intera producibili del campo. Un ulteriore aggiornamento di tale studio è stato poi fatto nell'ottobre del 2013 (*rel. GISE n° 19/13 del 20/10/2013*). I risultati hanno mostrato un incremento del 4% del valore del GOIP (da 2737 MSm³ stimati al 12/2010 a 2839 MSm³ stimati al 10/2013) e una riduzione delle riserve a vita intera dell'8% (da 1751 MSm³ valutati al 12/2010 a 1617 MSm³ valutati al 10/2013).

Nel corso del 2011 sono state a loro volta aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA n° 10/2011 – Campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza - Management Summary*) giungendo alle seguenti conclusioni:

- la subsidenza massima prevedibile sulla verticale dei giacimenti è di 7 cm;
- la corrispondente estensione del relativo cono (curva d'isosubsidenza di 2 cm)² è di circa 5 km dal centro del complesso dei giacimenti verso costa, ossia a più di 50 km dalla costa stessa.

Tale previsione è riferita al caso più cautelativo, mentre nel caso ritenuto più probabile l'impatto della subsidenza è ancora più ridotto (max. 3 cm).

Nel maggio del 2015 si è ancora aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica (*rel. GISE n°.01/2015 Campi di Tea Lavanda Arnica - Aggiornamento studio di giacimento - Scheda riassuntiva del maggio 2015*) con il calcolo di nuovo profilo di produzione che prevede un recupero di gas pari a 1723 MSm³ entro il 2018 (Figura 4).

In Figura 5 sono riportati gli andamenti storici delle portate di gas, d'acqua e la produzione cumulativa di gas al 31/12/16 pari a 1735 MSm³. Si noti che il volume di gas prodotto a oggi ha già raggiunto il valore previsto a fine vita del campo. Le portate attuali sono, comunque, esigue e in linea con il comportamento di un giacimento nelle fasi produttive terminali. L'attuale andamento del campo sarà ad ogni modo attentamente monitorato e, qualora fosse necessario, si farà un aggiornamento dei modelli fluido-dinamico e geomeccanico.

In Figura 6, Figura 7 e Figura 8 sono presentati i confronti tra i profili di pressione calcolati dal modello Eclipse 2015 e le pressioni statiche misurate per i livelli ritenuti più rappresentativi del campo. Tali confronti mostrano come la previsione modellistica sia più conservativa rispetto comportamento reale di detti livelli.

Sulla base dei risultati dello studio di giacimento del maggio 2015 sono state contestualmente aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA n° 05/2015 – Campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza-Management Summary*).

² Nei modelli geomeccanici di Tea, Lavanda e Arnica realizzati nel periodo 2002-2003 da Eni (Geertsma semi-analitico del 2001) e da Isamgeo (FEM del 2003), l'estensione del cono di subsidenza è stata fatta corrispondere alla linea d'isosubsidenza 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'isosubsidenza di 2 cm è da considerarsi "the limit of any physical identification of induced subsidence effects". Gli studi e le conclusioni della CSI 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'isosubsidenza di 2 cm come il contorno esterno che delimita il cono di subsidenza.

Tali previsioni sono state fatte con un modello geomeccanico elasto-plastico a elementi finiti (FEM Isamgeo), considerando il nuovo profilo produzione con uno start up del campo a novembre 2007 e una previsione di fine produzione al 2018. Sia le simulazioni con il modello di giacimento, sia con quello geomeccanico sono state protrate sino al 2047 per valutare gli effetti dell'evoluzione della pressione sia nelle regioni mineralizzate che in acquifero dopo la fine della produzione.

La stima della compressibilità delle rocce serbatoio stata fatta utilizzando una correlazione ottenuta da un'analisi statistica dei valori di compressibilità da misure "in situ" ottenute nei pozzi di monitoraggio perforati nei campi dell'Adriatico ed equipaggiati con markers.

I risultati delle previsioni di subsidenza ottenuti sono riportati nella tabella seguente:

| Data | Subsidenza massima [cm] | Estensione massima [km] | Distanza minima dalla costa [km] |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 2018 (fine produzione) | 5 | 6 | 52 |
| 2047 (fine simulazione) | 5 | 7 | 51 |

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza nel campo è previsto essere raggiunto alla fine della produzione e risulta pari a 5 cm;
- nel 2018 la massima estensione della linea d'isosubsidenza dei 2 cm - calcolata come distanza del punto di massima subsidenza da tale linea - è di a circa 6 km. Tale estensione raggiunge i 7 km al 2047, ovvero dopo 30 anni dalla fine della produzione (Fig. 9);
- Il fenomeno subsidenziale si esaurisce, quindi, a circa 51 km dalla costa.

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), viene rilevata da oltre un decennio 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 2014 (ultimo rilievo fatto), 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 1100 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 110 km di sviluppo lineare.

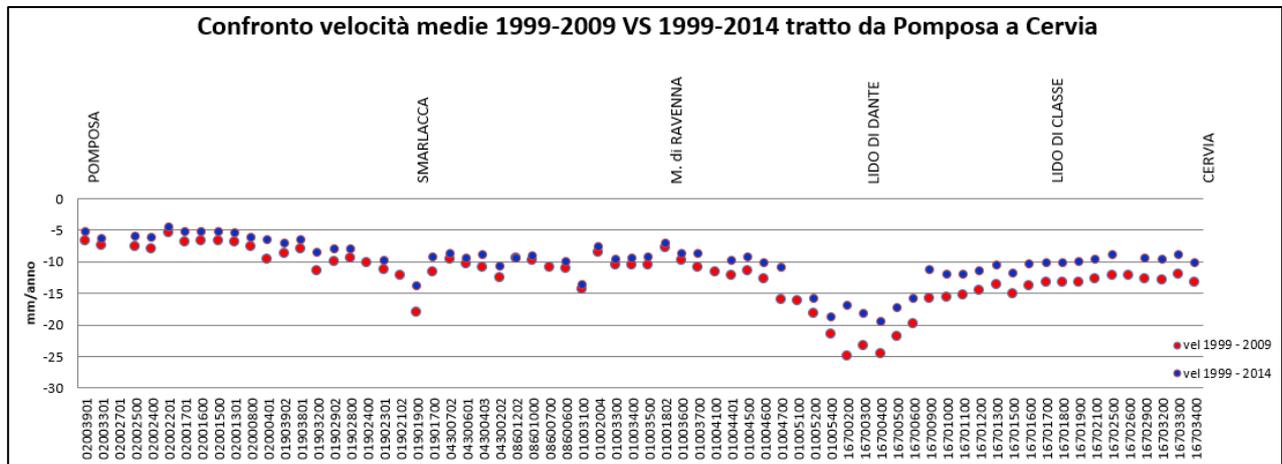
Le operazioni si sono svolte nel periodo compreso tra giugno e ottobre 2014 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell'ente certificatore.

Si ritiene opportuno sottolineare 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 compreso tra la zona di Pomposa e il centro abitato di 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 valutate con regressione lineare solo le velocità medie di abbassamento del suolo per quei capisaldi che presentano una serie storica di misure senza soluzione di continuità.

I risultati ottenuti per i periodi 1999-2009 e 1999-2014 sono riportati in Figura A: il confronto mostra come negli ultimi anni si sia avuta una generale diminuzione di velocità di subsidenza, diminuzione che è mediamente dell'ordine 2,4 mm/a, con una punta minima di 1,5 mm/a e una massima di 8,1 mm/a.

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



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

Al fine d’ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori. Considerando, infatti, solo i capisaldi con una serie storica ininterrotta di misure nel tratto di costa da Pomposa a Cervia, 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 $V_a > 10$ 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).

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.

L'elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2014 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.

Le campagne future (il prossimo rilievo è previsto nel 2017), potranno eventualmente meglio definire tale trend d'abbassamento, anche se non si possono escludere cedimenti locali dovuti a instabilità dei capisaldi stessi che saranno, comunque, oggetto di verifica durante le prossime campagne di misura.

Sebbene non siano presenti capisaldi con monumentazione e serie storica di misure sufficiente per un confronto puntuale con i dati CGPS, le velocità medie d'abbassamento del suolo ottenute dalle livellazioni nei punti prossimi alle stazioni CGPS, sono risultate comparabili con quelle rilevate dal monitoraggio CGPS (fatte salve le diverse precisioni dei due sistemi).

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (settembre 2016) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice 1) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 10).

Le attività di monitoraggio sono state potenziate negli ultimi anni mettendo in opera un numero crescente di stazioni CGPS sulle piattaforme offshore. 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) e 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 Bonaccia-NW (settembre 2015) e, infine, di Clara NW (marzo 2016).

Le serie storiche delle misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2014 - 2016, sono però ancora troppo brevi per consentire valutazioni specifiche.

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche SSU (Satel-

lite 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 2).

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) che, una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, entrerà a fare parte delle stazioni utilizzate per il monitoraggio della stabilità della costa.

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

I dati CGPS acquisiti sulla piattaforma Tea-Lavanda-Arnica, certificati fino al 2014 e in fase di certificazione per il 2015, 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 31/12/2016 (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 1.

Tabella 1 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2014

| 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 |
| TLA | 18,4 | 19,25 | -5,02 | 18,34 | 18,94 | -5,59 | 0,06 | 0,31 | -0,57 |

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

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine di avere un numero sufficiente di 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 misurato.

Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, quindi, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori sufficientemente elevati. In questi casi sarà possibile monitorare solo eventuali anomalie di trend, ma non procedere a un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

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

Le elaborazioni sono state fatte con software scientifico Bernese 5.2, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Nel corso del 2013, a seguito del rilascio del nuovo sistema di riferimento, sono stati rielaborati tutti i dati secondo il sistema ITRF2008-IGB08, al quale fanno riferimento i grafici della presente relazione.

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 Tea-Lavanda-Arnica, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, - anche se parzialmente incompleta a causa di work-over e successivi problemi di malfunzionamento della strumentazione - è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale⁴ pari a -4,3 mm/a (Figura 11 e Figura 13), sostanzialmente invariata rispetto a quanto riportato nella precedente relazione d'aggiornamento (-4,7 mm/a).

Nell'andamento temporale di tale dataset di misure CGPS, inoltre, si può osservare una variazione di velocità, correlabile con la storia produttiva del campo (Figura 12).

In particolare:

- la velocità media di subsidenza totale è di circa -6,2 mm/a nel periodo novembre 2007 (installazione del CGPS) - aprile 2012;
- una velocità media di subsidenza totale è di circa -2,7 mm/a nel periodo aprile 2012 - dicembre 2016.

Si segnala che le differenze dei risultati delle velocità, che si possono registrare rielaborando in epoche successive i dati di periodi pregressi, dipendono dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta la ridefinizione degli outlier mediante il test a tre Sigma su tutta la serie storica esistente.

Le misure CGPS sono state, poi, confrontate con i risultati calcolati dal modello geomeccanico senza depurare tali misure dalla componente di subsidenza naturale. Il confronto (Figura 14), mostra un buon accordo fra valori misurati e calcolati.

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

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.

| | | |
|--|--|-------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 14 - of 64 |
|--|--|-------------------|

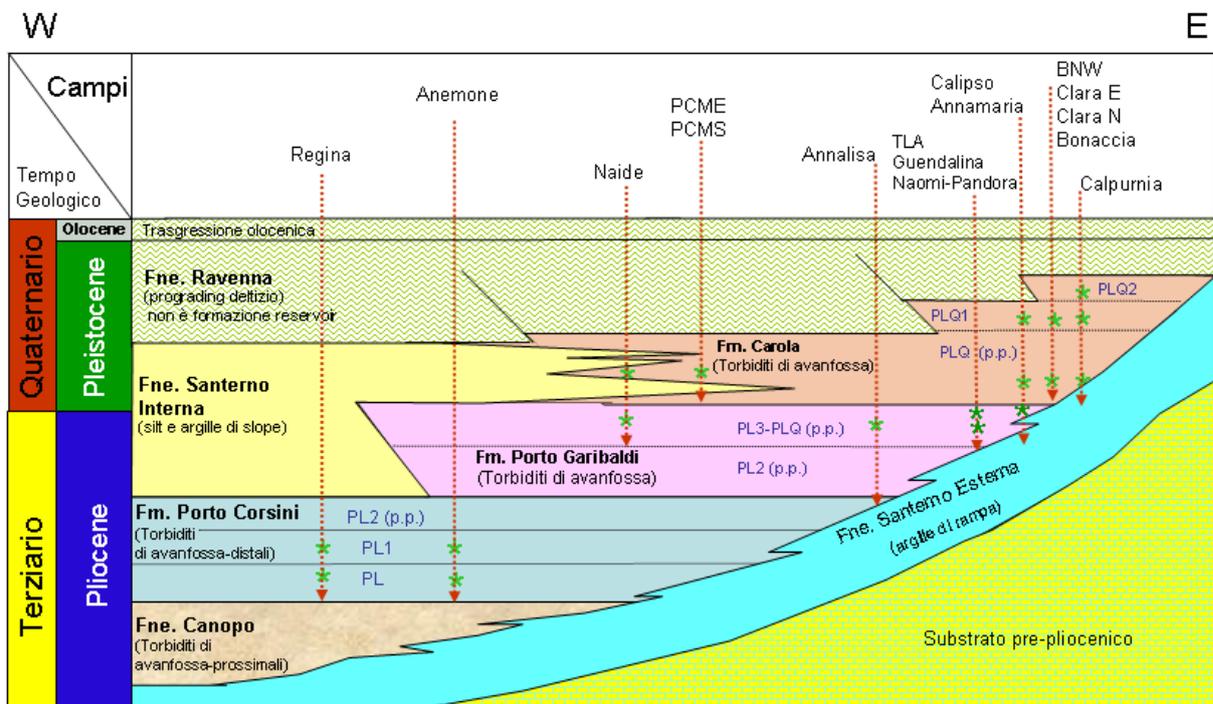
dal campo di Tea-Lavanda-Arnica siano di piccola entità e, soprattutto, non abbiano alcun impatto sull'andamento altimetrico del tratto di costa antistante.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 15 viene presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 16 – viene presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.



Figura 1 – Posizione del campo di TLA



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

Figura 2 – Schema dei rapporti stratigrafici

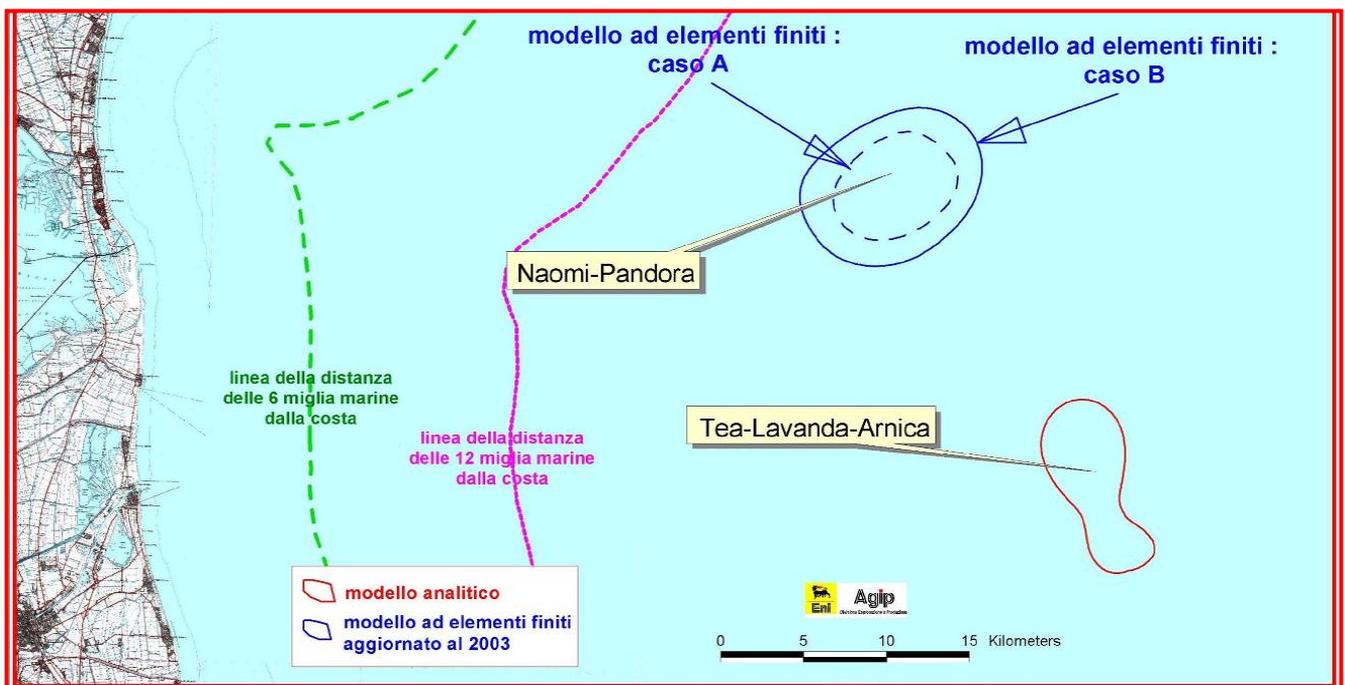
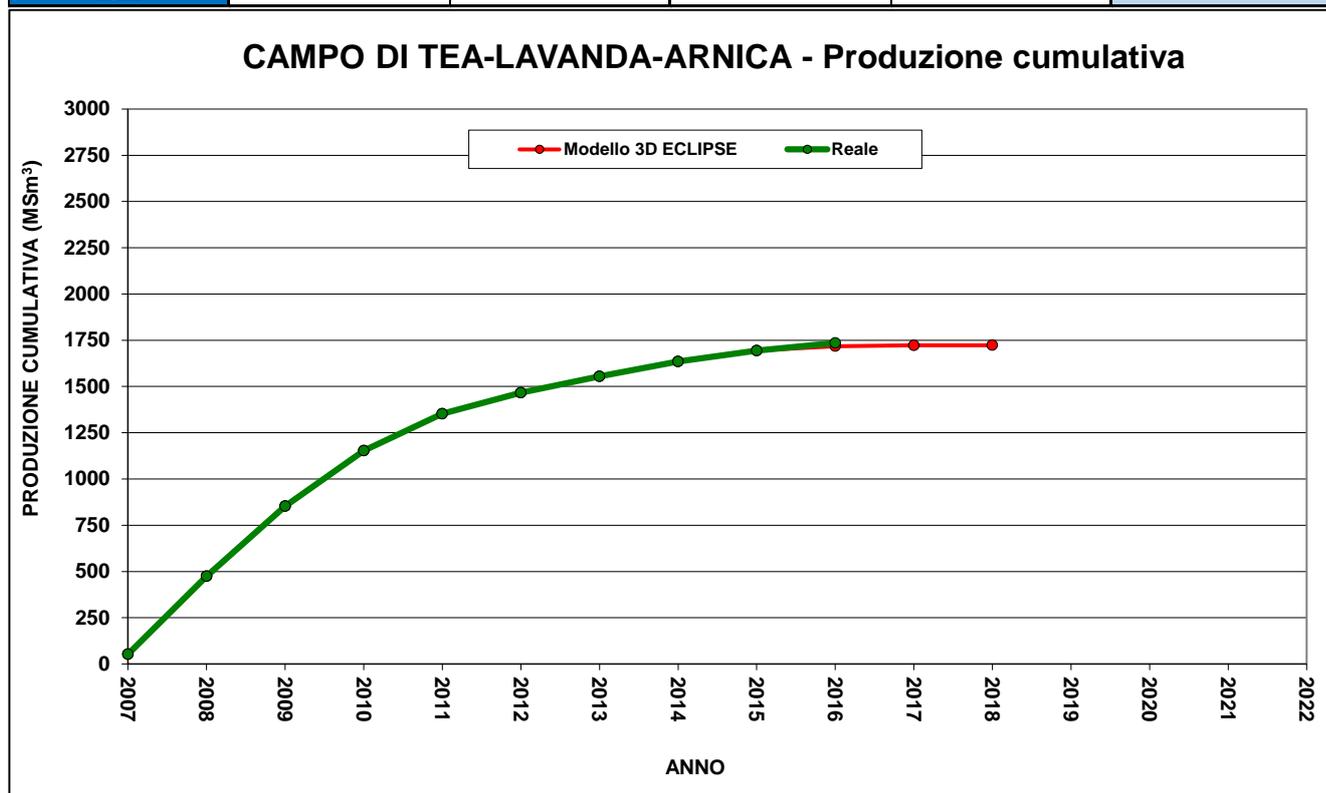


Figura 3 – Verifica dell'interazione geomeccanica fra i campi di TLA e di Naomi-Pandora



| CAMPIDI TEA-LAVANDA-ARNICA | | | | | |
|----------------------------|--|--------------------|---|--------------------|---|
| 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 | |
| 2007 | 53 | 53 | 53 | 53 | 3% |
| 2008 | 422 | 422 | 474 | 474 | 28% |
| 2009 | 379 | 379 | 853 | 853 | 50% |
| 2010 | 300 | 300 | 1154 | 1154 | 67% |
| 2011 | 199 | 199 | 1353 | 1353 | 79% |
| 2012 | 114 | 114 | 1467 | 1467 | 85% |
| 2013 | 87 | 87 | 1554 | 1554 | 90% |
| 2014 | 81 | 81 | 1635 | 1635 | 95% |
| 2015 | 58 | 59 | 1694 | 1694 | 98% |
| 2016 | 42 | 23 | 1735 | 1718 | 101% |
| 2017 | | 4 | | 1722 | |
| 2018 | | 1 | | 1723 | |
| 2019 | | | | | |
| 2020 | | | | | |
| 2021 | | | | | |
| 2022 | | | | | |



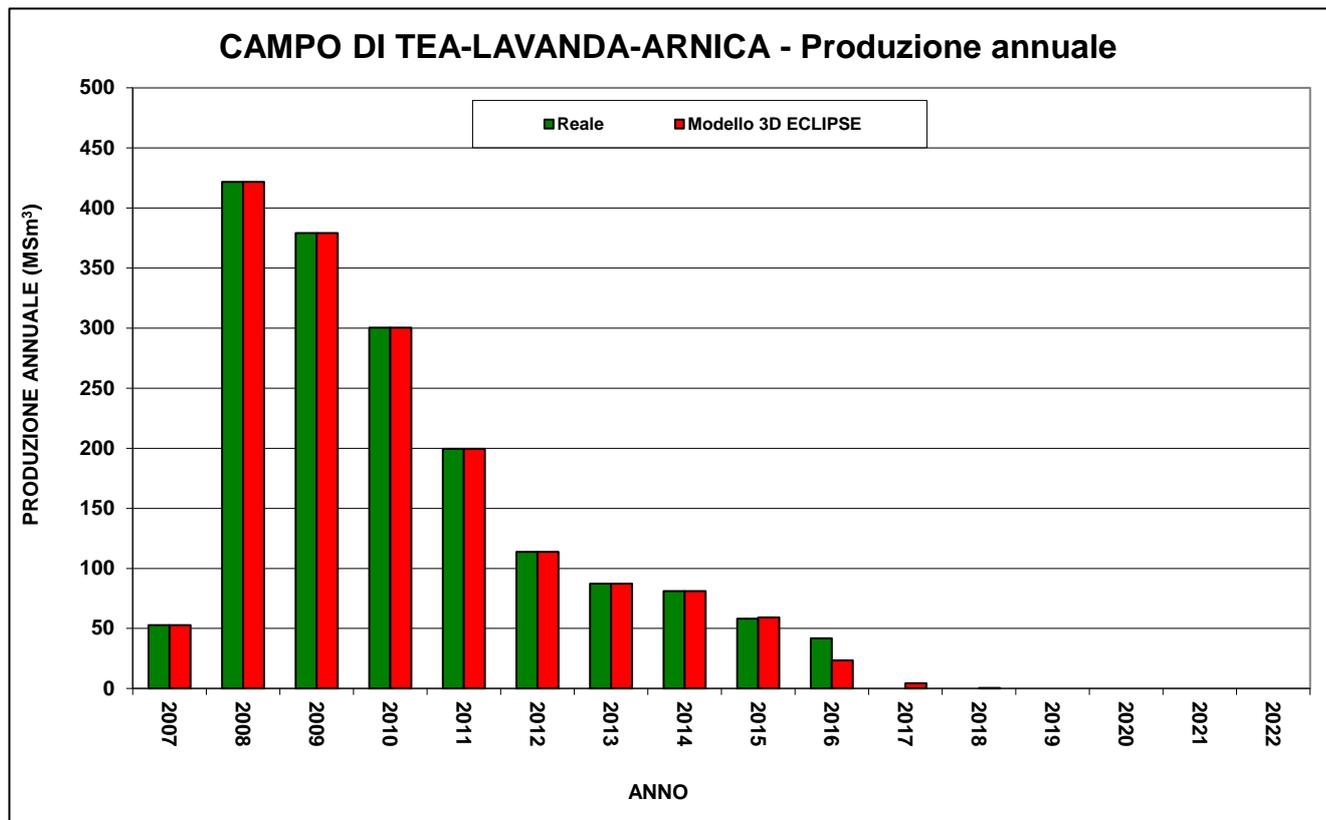


Figura 4 – Campo di TLA: tabella e grafico di produzione vs. modelli Eclipse 2015

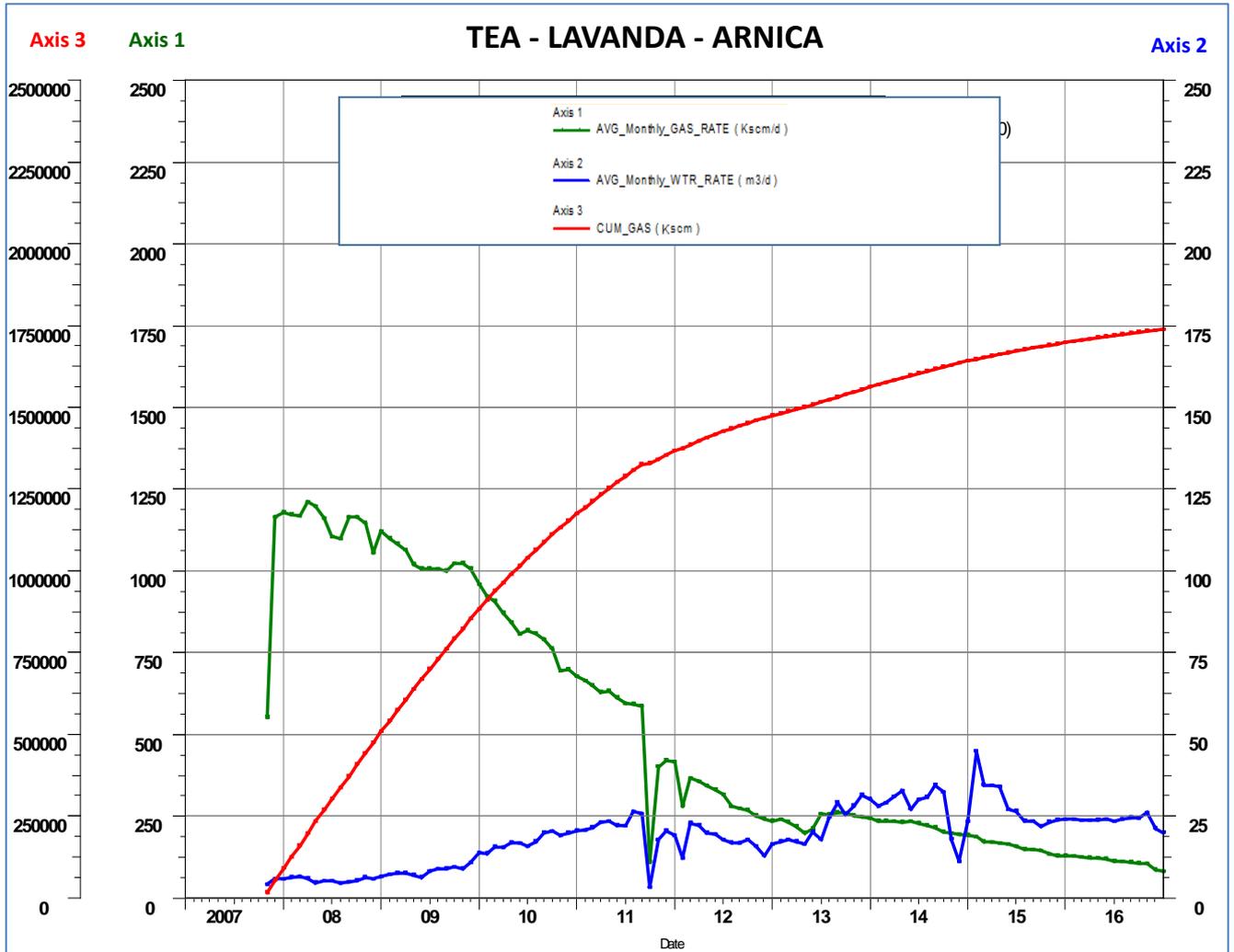


Figura 5 – Campo di TLA: grafico di produzione storica



| CAMPI DI TEA-LAVANDA-ARNICA | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|
| Data | Livello PL3-H | | | Livelli PL3-H+H1 | | | Livello PL3-F1 | | |
| | Pressione (bara) | RFT in pozzo | Profilo in string | Pressione (bara) | RFT in pozzo | Profilo in string | Pressione (bara) | RFT in pozzo | Profilo in string |
| 19/10/1999 | 304 | Lav 1 Dir | | 305 | Lav 1 Dir | | 300 | Lav 1 Dir | |
| 29/07/2008 | 255 | | Lav 1 C/L | 264 | | Tea 2 C | 233 | | Lav 2 C/L |
| 02/05/2009 | 220 | | Lav 1 C/L | 235 | | Tea 2 C | 195 | | Lav 2 C/L |
| 09/06/2011 | 166 | | Lav 1 C/L | | | | 159 | | Lav 2 C/L |
| 17/10/2011 | 167 | | Lav 1 C/L | 183 | | Tea 2 C | 174 | | Lav 2 C/L |
| 13/12/2013 | 145 | | Lav 1 C/L | | | | | | |
| 16/10/2014 | 140 | | Lav 1 C/L | | | | 195 | | Lav 2 C/L |
| 24/07/2015 | 134 | | Lav 1 C/L | | | | 235 | | Lav 2 C/L |
| 08/12/2016 | 134 | | Lav 1 C/L | | | | 256 | | Lav 2 C/L |



Figura 6 – Campo di TLA: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2015 (livello PL3-H)

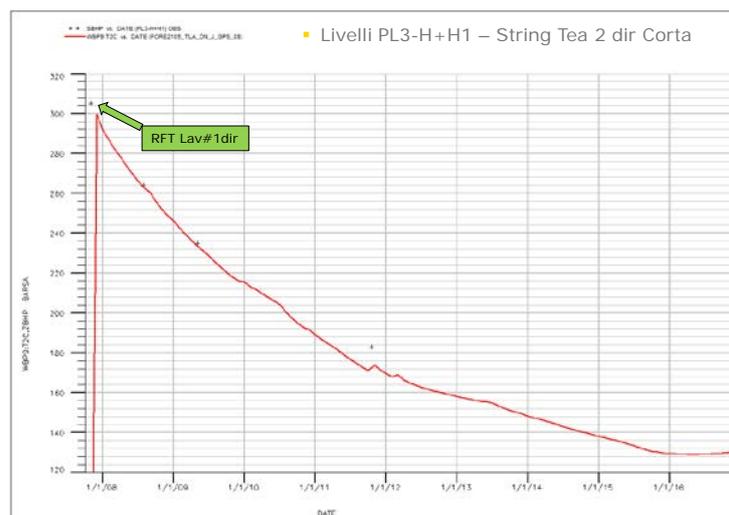


Figura 7 – Campo di TLA: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2015 (livello PL3-H-H1)

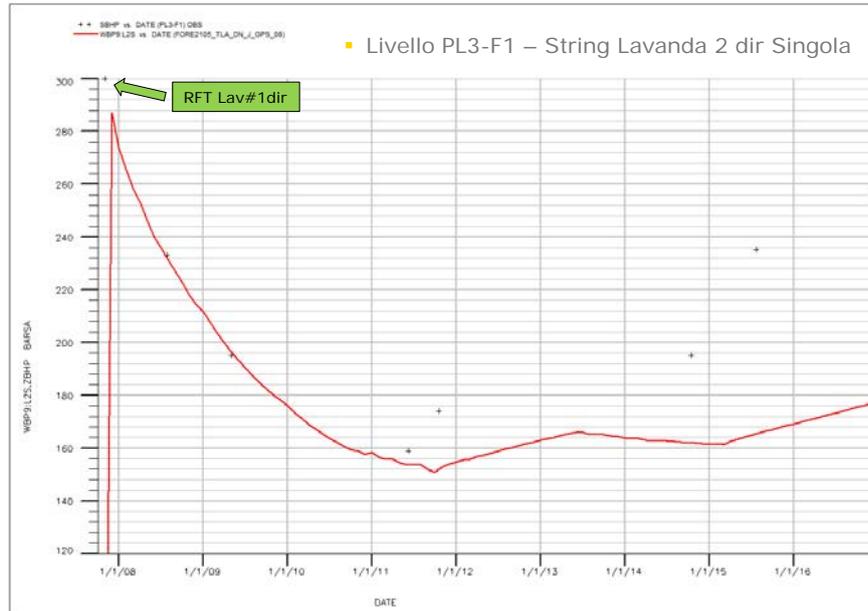


Figura 8 – Campo di TLA: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2015 (livello PL3-F1)

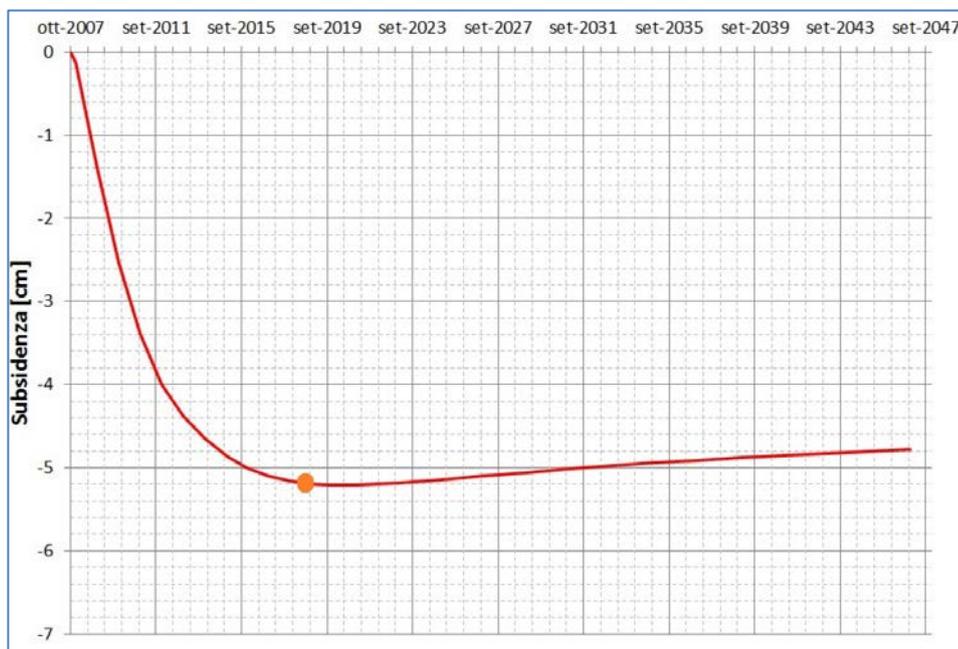
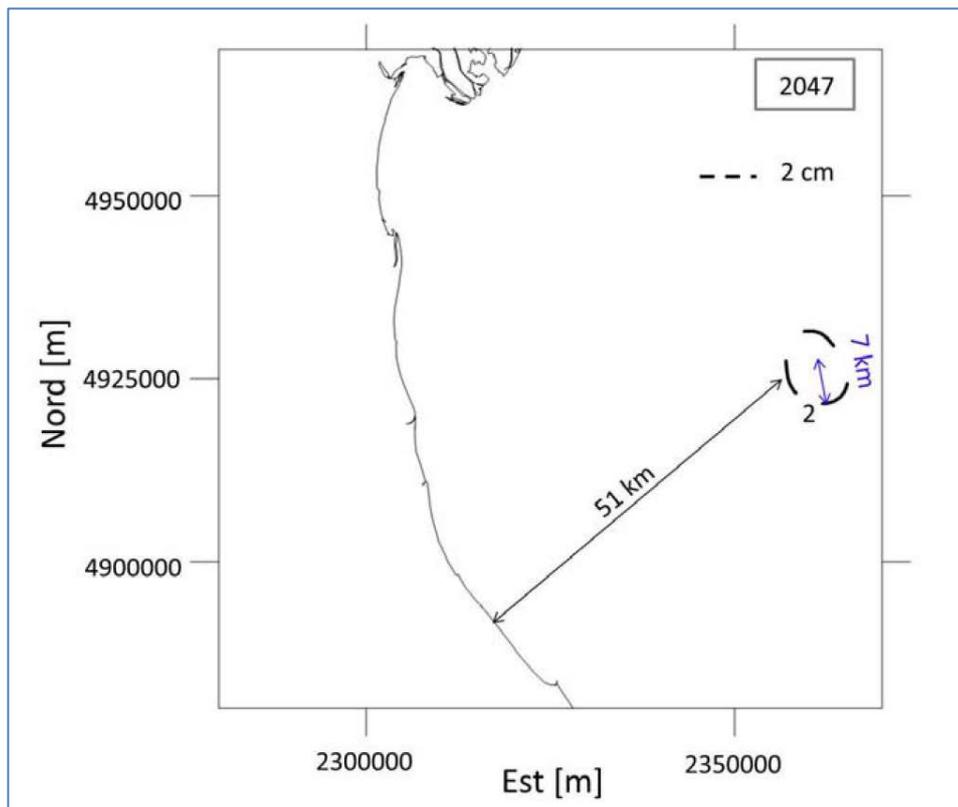


Figura 9 – Campo di TLA: curve d'isosubsidenza (in alto) a fine simulazione (2047) ed evoluzione nel tempo della subsidenza massima (in basso).

Il cerchio arancione indica l'abbassamento atteso al termine della produzione (settembre2018)



Serie storica spostamenti IGB08 RETE Tea_Lavanda_Arnica

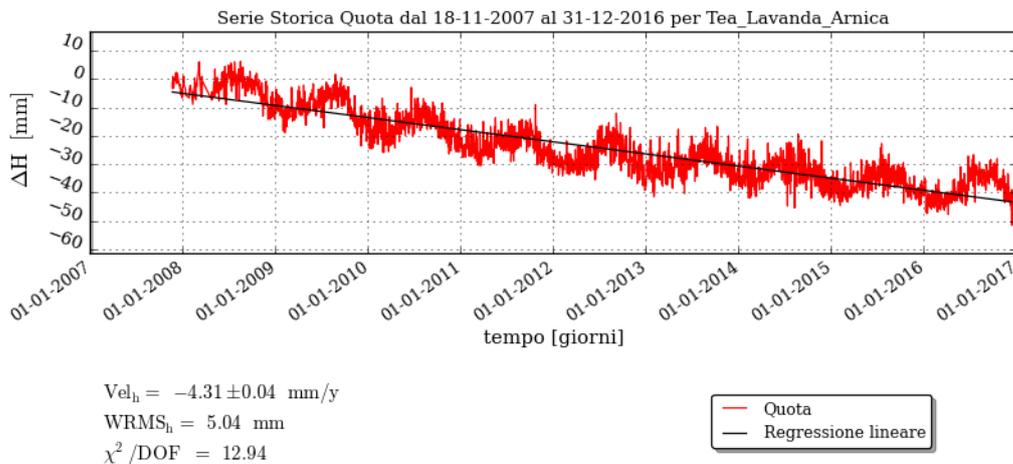
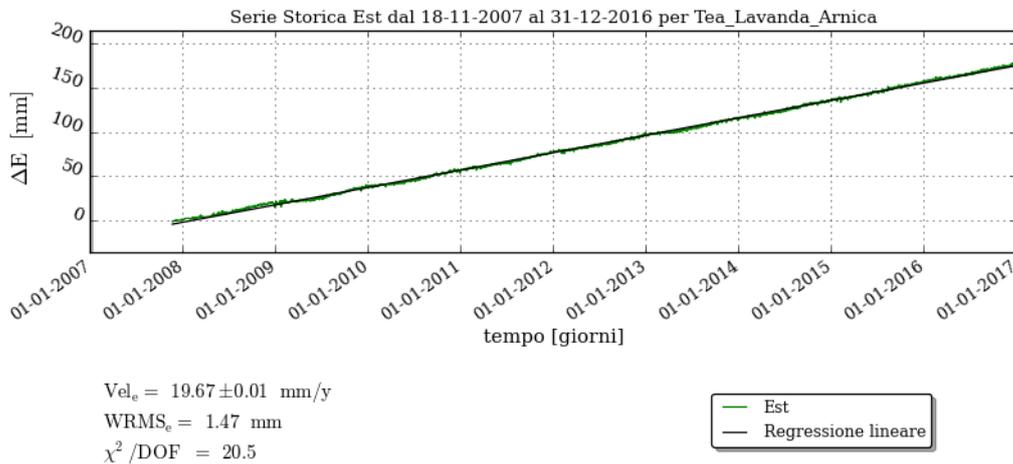
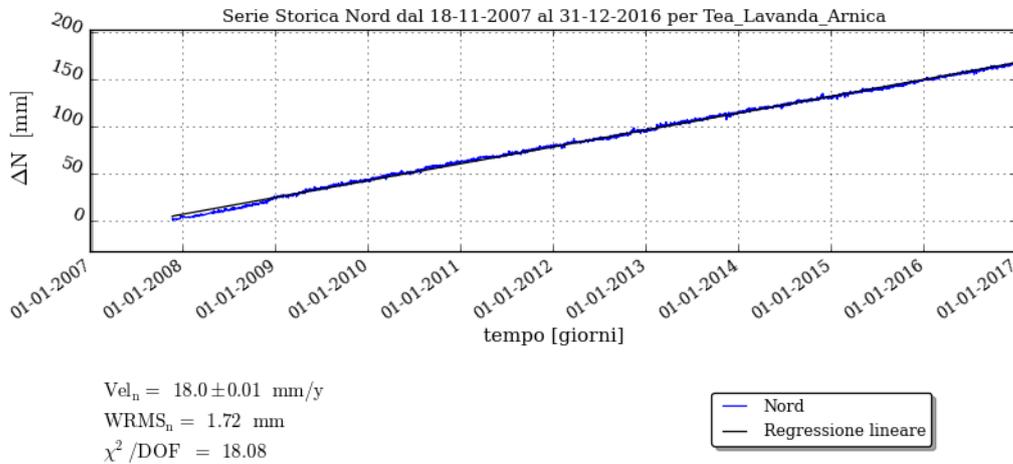
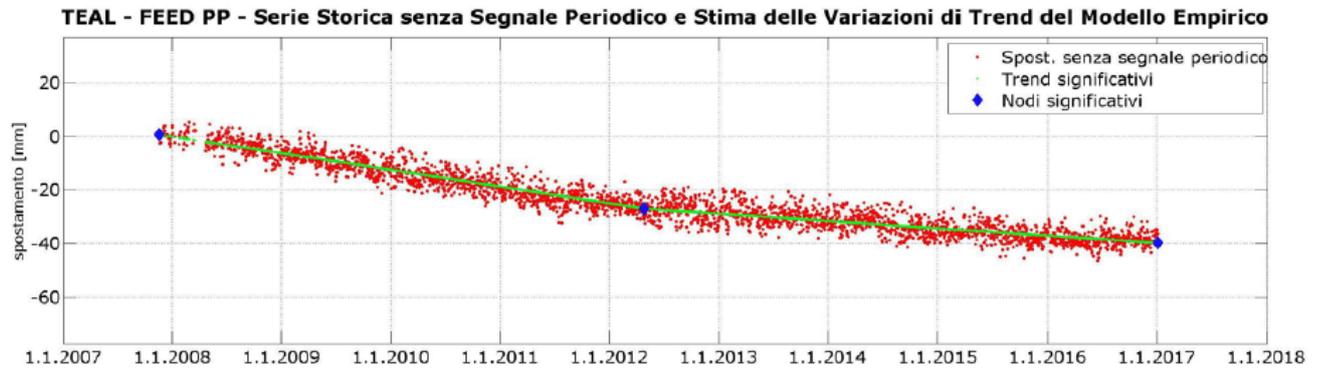


Figura 11 – Campo di TLA: serie storiche plano-altimetriche CGPS



| FEED PP - MODELLO EMPIRICO | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| Periodo | velocità [mm/y] | sigma [mm/y] |
| 18/11/2007 - 24/04/2012 | -6.2 | 0.1 |
| 24/04/2012 - 31/12/2016 | -2.7 | 0.1 |

Figura 12 – Campo di TLA: analisi della serie storica plano-altimetrica CGPS

| CAMPO | Inizio produzione | Fine Produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse) | Riserve prodotte @ dic.2016 | Max Subsidenza prevista - scenario di riferimento | Ultimo aggiornamento studio | CGPS | | |
|--------------------|-------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | | | | | inizio registrazione | vel.media (mm/a) @ dic.2016 | TREND rispetto @ dic. 2015 |
| ANEMONE | 1978 | 2018 | 100% | -36cm al 2018 | 2015 | giu-07 | -4,7 | invariato |
| ANNALISA | 2000 | 2023 | 93% | -10cm al 2027 | 2014 | ott-07 | -4,1 | invariato |
| ANNAMARIA B | 2009 | 2039 | 66% | -51cm al 2040 | 2013 | gen-10 | -108,6 | aumento |
| BARBARA-NW | 1999 | 2040 | 71% | -76cm al 2024 | 2013 | gen-08 | -29,6 | invariato |
| BONACCIA | 1999 | 2035 | 65% | -423cm al 2033 | 2014 | dic-07 | -76,2 | diminuzione |
| BONACCIA NW | 2015 | | | | | set-15 | n.d. | n.d. |
| CALIPSO | 2002 | 2026 | 82% | -33cm al 2021 | 2013 | nov-07 | -15 | diminuzione |
| CALPURNIA | 2000 | 2017 | 100% | -54cm al 2021 | 2013 | giu-07 | -2 | diminuzione |
| CLARA EST | 2000 | 2030 | 44% | -56cm al 2026 | 2013 | nov-07 | -13,5 | invariato |
| CLARA NW | 2015 | | | | | mar-16 | n.d. | n.d. |
| CLARA NORD | 2000 | 2020 | 82% | -68cm al 2021 | 2013 | nov-07 | -23,6 | invariato |
| ELETTRA | 2014 | 2026 | 57% | -18cm al 2065 | 2013 | lug-14 | -23,6 | n.d. |
| FAUZIA | 2014 | 2024 | 53% | -11cm al 2060 | 2013 | set-14 | -5,5 | n.d. |
| GUENDALINA | 2011 | 2023 | 86% | -3cm al 2023 | 2015 | ago-11 | -5,4 | diminuzione |
| NAIDE | 2005 | 2022 | 88% | -8cm al 2023 | 2013 | giu-05 | -3,45 | invariato |
| NAOMI-PANDORA | 2001 | 2037 | 43% | -3cm al 2068 | 2013 | giu-02 | -1,5 | invariato |
| PCC (PCMS 1,2) | 2001 | 2014 | 100% | -6,8cm al 2017 | 2016 | lug-05 | -3,8 | invariato |
| REGINA | 1997 | 2023 | 91% | -139cm al 2044 | 2013 | giu-07 | -25,5 | diminuzione |
| TEA-LAVANDA-ARNICA | 2007 | 2018 | 101% | -5cm al 2018 | 2015 | nov-07 | -4,3 | invariato |

Figura 13 - Velocità medie di “subsidenza totale” calcolate per tutta la serie storica dei dati CGPS vs. modelli

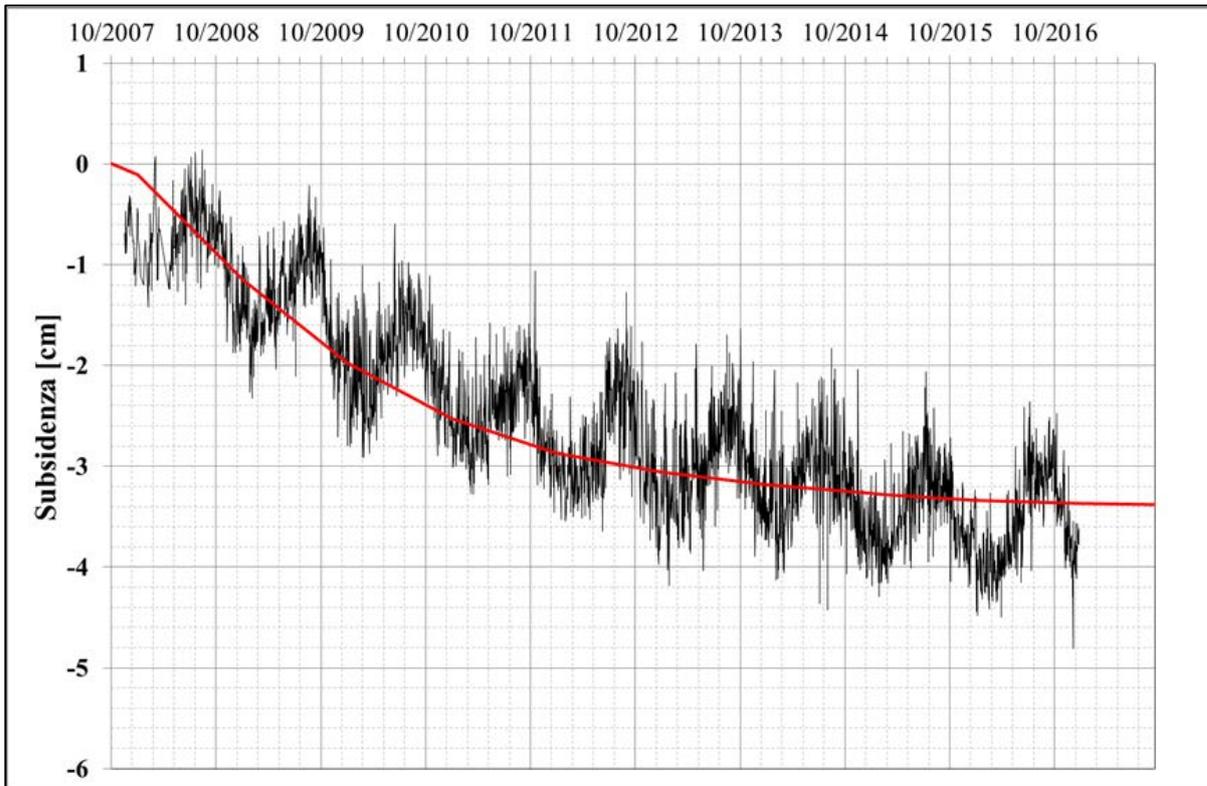


Figura 14 – Campo di TLA: confronto tra spostamento simulato (linea nera) e spostamento misurato (linea rossa), in corrispondenza della stazione CGPS di Tea.

| campo TEA-LAVANDA-ARNICA (Eni 100%) | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| DATI DI CAMPO | | DECRETO VIA n. 00149 del 02 marzo 2004 (notifica DSA n. 0010973 del 13 aprile 2006) | |
| UBICAZIONE | offshore - 58 Km E Marina di Ravenna | AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (TEA-LAVANDA ARNICA) | |
| PROFONDITA' FONDALE | 40 m | | |
| LITOLOGIA | terreni plocenici sabbioso/argillosi | SIA | |
| FORMAZIONE RESERVOIR | Porto Garibaldi | MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00" | Agg. studio di giac. - Scheda riassuntiva, Rel. GISE-01/2015 (maggio 2015) |
| ZONA MINERARIA | Pl3 | RISERVE (MSm3) | 1536 |
| PROFONDITA' RESERVOIR | 2700 - 2840 (TVSS) | MOD. GEOMECCANICO | GEERTSMA SEMIANALITICO (luglio 2001) |
| TIPO DI PIATTAFORMA | fissa - standard | MAX SUBS AL CENTRO (cm) | 1,8 (dopo 7 anni) |
| CARATTERISTICHE GEOLOGICHE | torbiditi sottili | MAX DIST. DAL CULMINE (Km) | limitata all'area complessiva dei tre giacimenti |
| | | | ULTIMO AGGIORNAMENTO |
| | | | ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ ottobre 2011 |
| | | | 3 (nel 2020 a fine prod.) per lo scenario di riferimento (Cm. Med) |
| | | | 5 (nel 2040) nel caso più sfavorevole (Scenario Cm Up) |
| | | STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI | |
| CONCESSIONE | A.C34.AG | | |
| DATA SCADENZA CONCESSIONE | 19/06/2024 | | |
| N. POZZI | 4 | | |
| RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm3) | 1536 | | |
| START UP PRODUZIONE | ott-07 | | |
| FINE PRODUZIONE PREVISTA | 2017 | | |
| GAS PRODOTTO (MSm3) | | | 1735 |
| % RISERVE PRODOTTE | | | 101% |
| | | LIVELLAZIONI | ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA) ANTISTANTE I CAMPI NEL PERIODO 1998-2009, 2011 e 2014. I DATI SONO STATI CERTIFICATI (fino al 2014) DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM IL PROSSIMO RILIEVO DELLA " DORSALE ADRIATICA " SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2017 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE I GIACIMENTI |
| | | MARKERS | NON PRESCRITTI |
| | | CGPS | OPERATIVO DAL 2007 |
| | | SAR | ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ SETT.2016 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 15 – Campo di TLA: Scheda di sintesi dei dati del campo

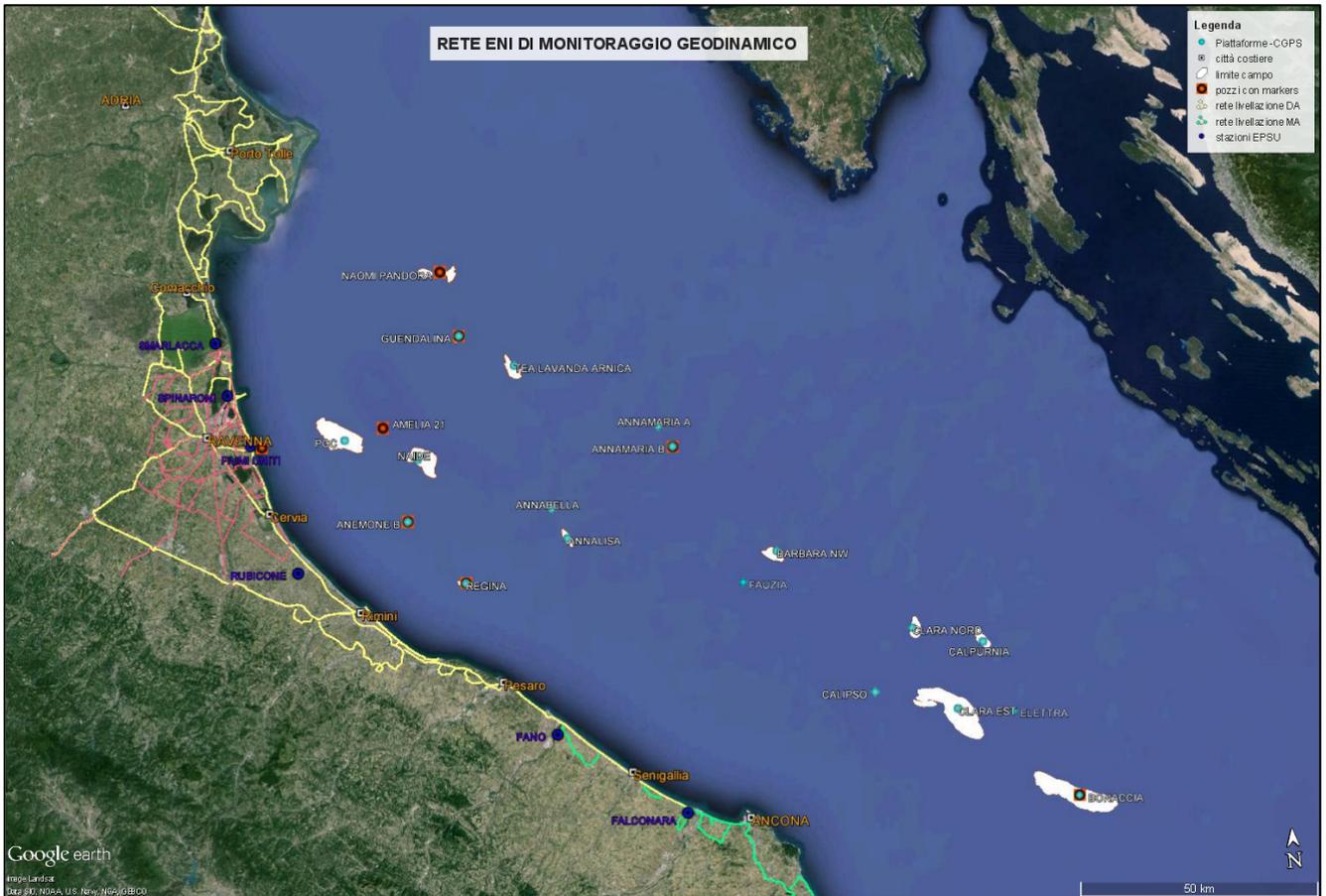


Figura 16 – Particolare della rete di monitoraggio Eni

Appendice 1: aggiornamento dati SAR 2003-2016

L'analisi dei dati SAR ha interessato complessivamente 3 data-set (Fig. 1A), suddivisi geograficamente in:

1. Area di Ravenna da Porto Tolle a Cervia
2. Area di Rimini da Cervia a Cattolica
3. Area di Ancona da Cattolica a Civitanova Marche.

In tali aree, che presentano una piccola zona di sovrapposizione sufficiente a garantire continuità nei dati, sono ubicate le seguenti stazioni CGPS della rete Eni:

1. Area di Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti
2. Area di Rimini: Rubicone
3. Area di Ancona: Fano e Falconara.



Fig. 1A - Mappa calibrazione dati SAR

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

Per il processo di calibrazione si è impiegata la misura della velocità verticale di spostamento del suolo dell'area SAR più a nord (area ravennate), utilizzando in particolare le misure della stazione di Smarlacca. I dati acquisiti a Fiumi Uniti, a Spinaroni e in tutte le altre stazioni sono stati impiegati esclusivamente per la verifica dei risultati ottenuti.

Per la valutazione delle velocità verticali di spostamento del suolo sulla base dei dati GPS si è impiegata tutta la serie storica disponibile di tali misure che, però, per le stazioni CGPS di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti è iniziata a una data leggermente anteriore rispetto a quella d'inizio misure SAR. Si è, comunque, accertato che i valori di velocità così ottenuti differiscono in modo del tutto trascurabile ($< 1 \text{ mm/a}$) rispetto a quelli che si otterrebbero dagli stessi dati GPS, utilizzando però una serie storica di misure leggermente ridotta, avente cioè la stessa data d'inizio di quella dei dati SAR.

L'analisi dei dati SAR non calibrati e acquisiti in un'area circolare (raggio di circa 300 m) intorno alla stazione CGPS di Smarlacca, ha consentito di stimare una velocità media d'abbassamento del suolo di $-3,22 \pm 0,42 \text{ mm/a}$. Dato che la corrispondente velocità media ottenuta dalle misure del CGPS di Smarlacca è di $-6,37 \pm 0,01 \text{ mm/a}$, si ha uno scostamento fra le due misure di $-3,15 \pm 0,43 \text{ mm/a}$. Ai valori di velocità media della componente verticale, determinata con il monitoraggio SAR, si è applicata, pertanto, una correzione pari a $-3,15 \pm 0,43 \text{ mm/a}$. Si sono poi confrontati tali dati SAR con le misure dei CGPS di Manara, Fiumi Uniti e Spinaroni considerando i punti SAR disponibili in un'area circolare (raggio pari a 300 m) intorno a tali stazioni. Il confronto ha mostrato differenze mediamente inferiori a 1 mm/a tra le misure GPS e i dati SAR calibrati, confermando la bontà del procedimento seguito.

In Fig. 2A sono rappresentati i dati SAR per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Comacchio a Cervia ottenuti a valle del processo di calibrazione. Tali dati sono stati ottenuti per interpolazione con un algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) mediante Tool ArcGis Spatial Analyst®.

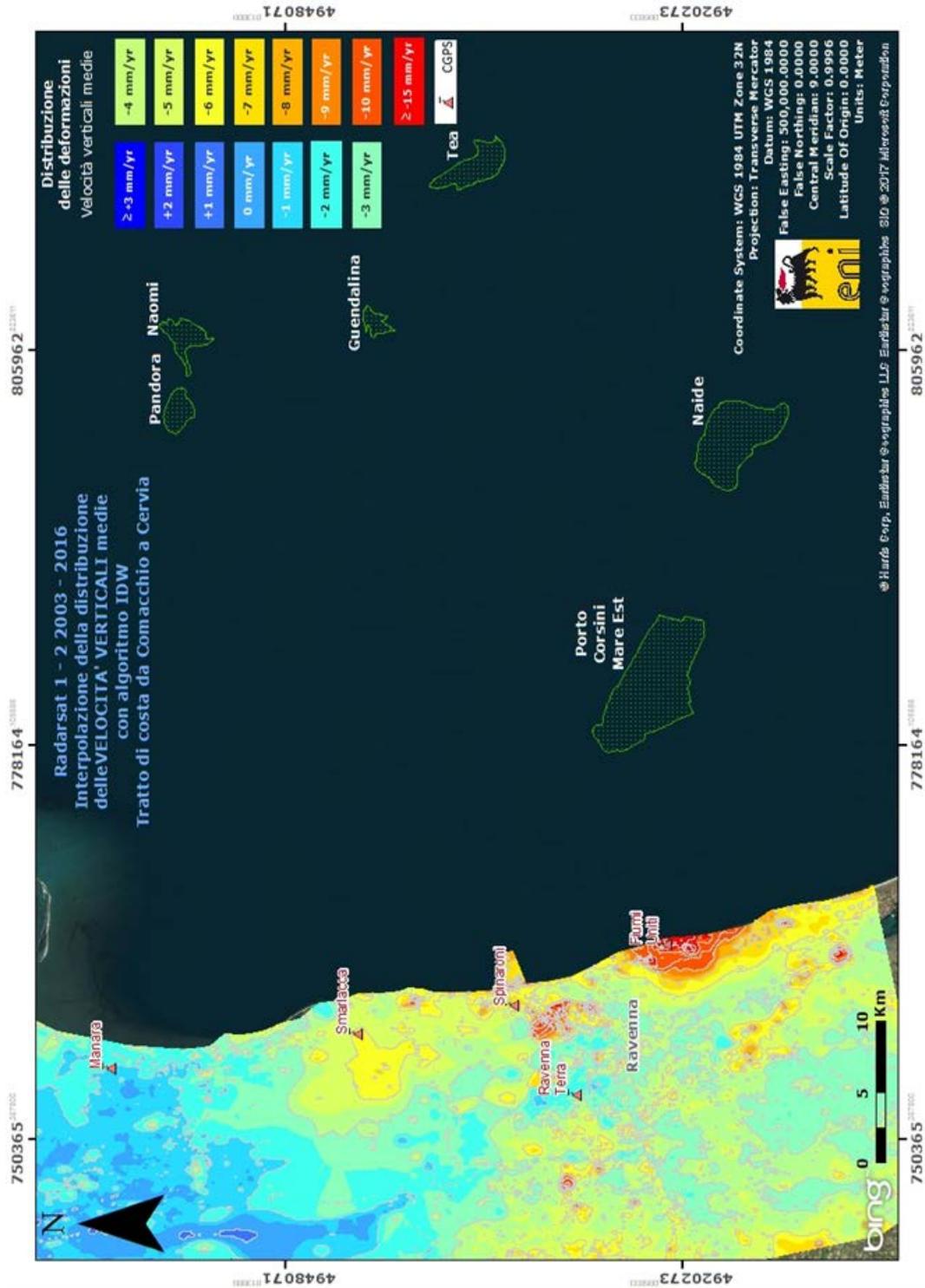


Fig. 2A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2016, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Comacchio a Cervia

A differenza di quanto fatto negli anni precedenti, gli altri data set acquisiti (area di Rimini e area di Ancona, vedi Fig. 1A) sono stati analizzati separatamente da quello dell'area Ravennate, poichè si è osservato un buon accordo fra le misure SAR e quelle registrate dalle stazioni CGPS site all'interno di ciascuna delle 2 aree sopracitate. Inoltre, con il consolidarsi della serie storica di misure SAR (circa 14 anni di dati) si è notato come la calibrazione delle aree di Rimini e Ancona - fatta a partire da quella di Ravenna e impiegando un valore di calibrazione ottenuto come media delle componenti verticali delle velocità di spostamento del suolo nelle zone di sovrapposizione tra le diverse aree - introduca un errore sistematico. Tale errore, che consiste in uno spostamento verticale fittizio ed è probabilmente causato anche alla propagazione della varianza, non può essere ignorato e, pertanto, sconsiglia l'applicazione della procedura di calibrations "a catena" fatta nel passato.

Per l'area di Rimini, analizzata congiuntamente a quella di Ancona-Fermo, il procedimento seguito per la mosaicatura e calibrazione del dato SAR è illustrato sinteticamente nello schema esemplificativo di Fig. 3A.

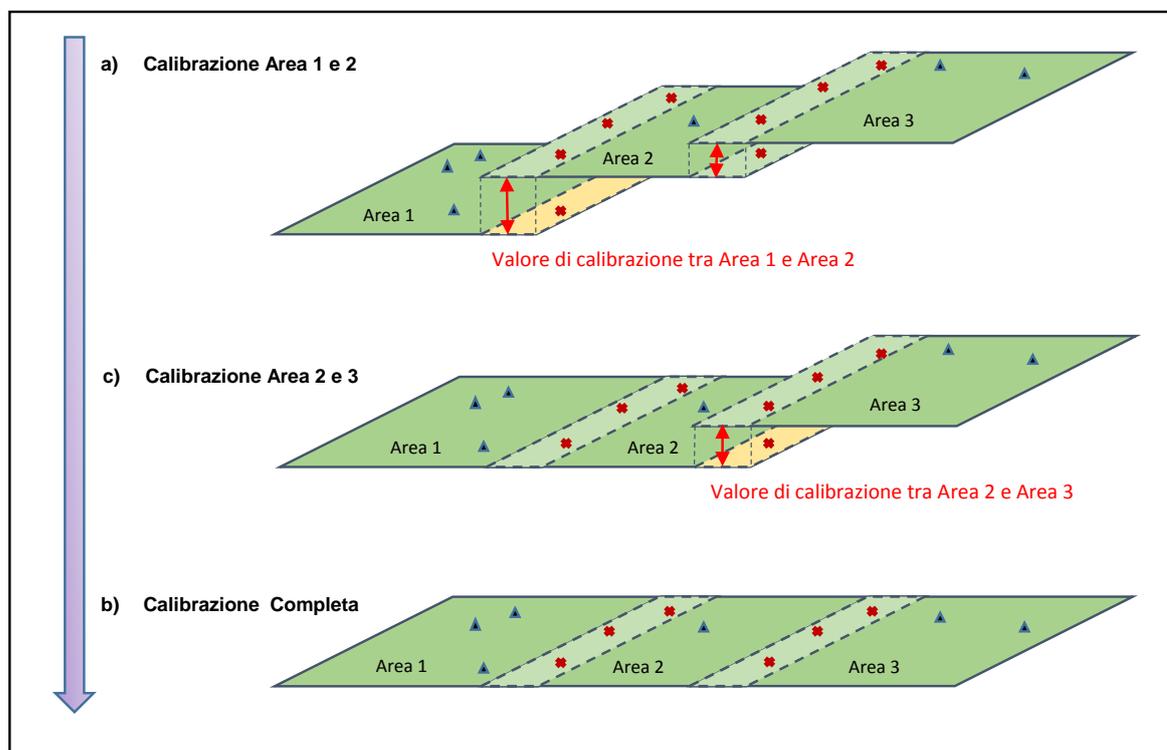


Fig. 3A – Schema illustrativo del processo di calibrazione delle immagini SAR con misure CGPS

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

Data l'ottima concordanza fra i dati CGPS e quelli SAR si è deciso, quindi, di non calibrare questi ultimi.

Si sono poi confrontate le velocità verticali di spostamento del suolo misurate dai PS nella zona di sovrapposizione tra l'area di Ancona e quella di Rimini (Fig. 3A). Per quanto osservato in precedenza (non calibrazione dato SAR vs. GPS in quanto trascurabile) la mosaicatura/calibrazione è stata fatta in modo diretto senza alcun delta tra le due zone sovrapposte.

A valle del processo di mosaicatura/calibrazione si è esaminato l'andamento della differenza di velocità verticali tra misure SAR e dati CGPS per l'area di Rimini (Stazione S.S.U. di Rubicone, vedi Fig. 1A). Nella zona situata nell'intorno della stazione CGPS di Rubicone - installata nel dicembre 2007 - i data-set SAR (area SAR di Rimini), mostrano un rallentamento della velocità di subsidenza a partire dal 2008 (analisi dettagliata presentata nel 2013). La differenza fra le stime di tale velocità ottenute rispettivamente con le misure GPS e quelle SAR è di 1.96 ± 0.67 mm/a. Al solito, la velocità media SAR è stata calcolata considerando i PS compresi in un intorno di 300 metri dalla stazione.

In Fig. 4A è visualizzata l'immagine ottenuta per interpolazione dei dati calibrati relativi alle aree di Ancona-Fano e Rimini. Per tale operazione si è impiegato l'algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) mediante Tool ArcGis Spatial Analyst®.

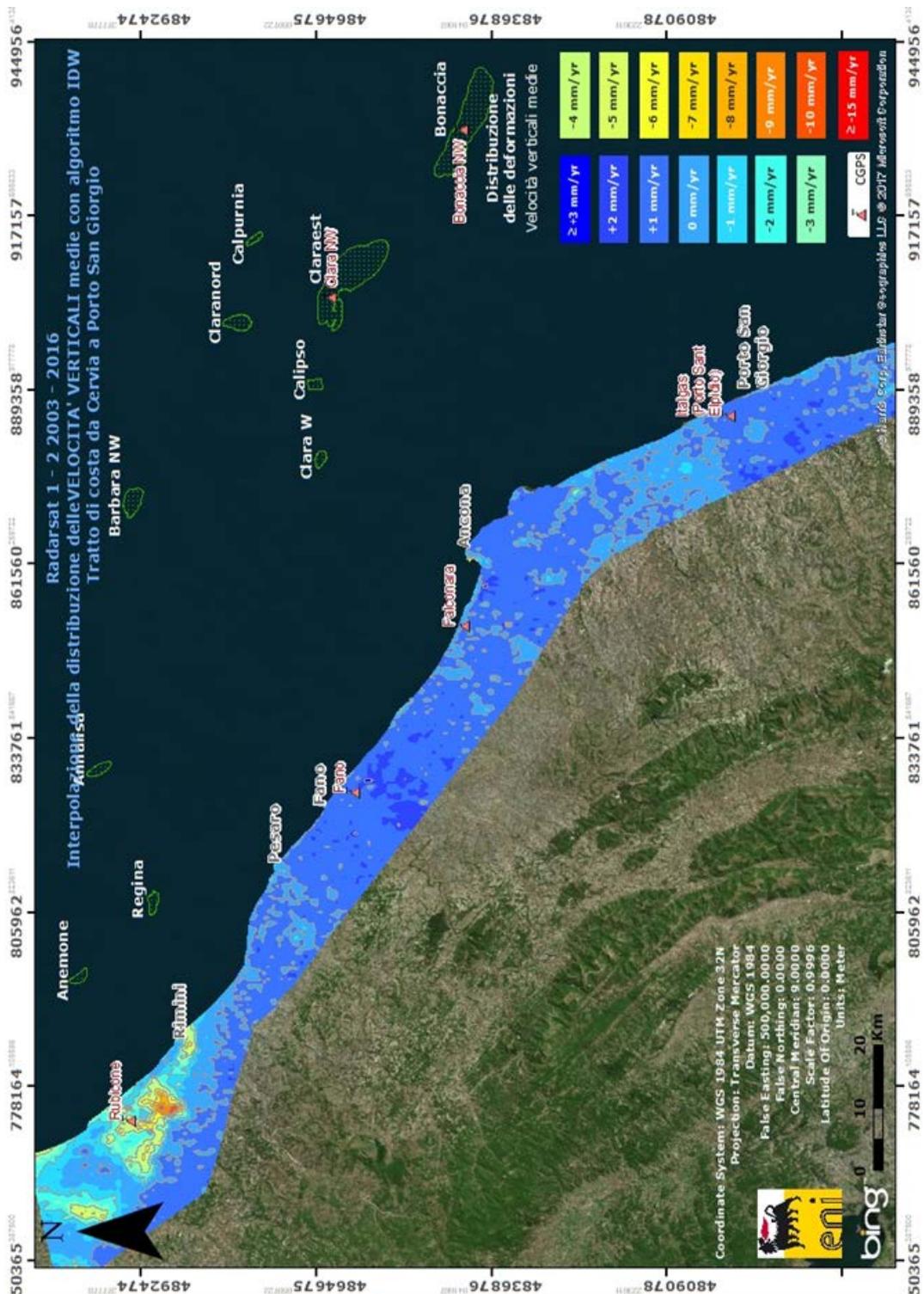


Fig. 4A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2016, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Cervia a Porto San Giorgio

Confronto dati SAR 2003 – 2015 vs 2003 – 2016

Un confronto diretto tra i dati 2003 – 2015 e i dati 2003 – 2016 sull'intero tratto di costa da Comacchio a Porto San Giorgio non è possibile in quanto le analisi 2016 dei dati SAR sono state effettuate con procedura differente rispetto all'anno precedente.

E' possibile però effettuare un confronto per quanto riguarda l'area di Ravenna e l'area di Fermo-Ancona.

Come mostrano le immagini di Fig. 5A e Fig. 6A, non si notano delle differenze importanti, il valore modale si attesta intorno a -3,5 mm. L'unica area con valori di differenza che sono in media dell'ordine di -7 mm, è situata a sud della città di Ravenna. Questa anomalia è però molto probabilmente causata da una mancanza di dati in tale area per la scarsa coerenza del segnale SAR. Ciò ha prodotto un artefatto numerico, privo di significato fisico, nelle relative mappe d'interpolazione.

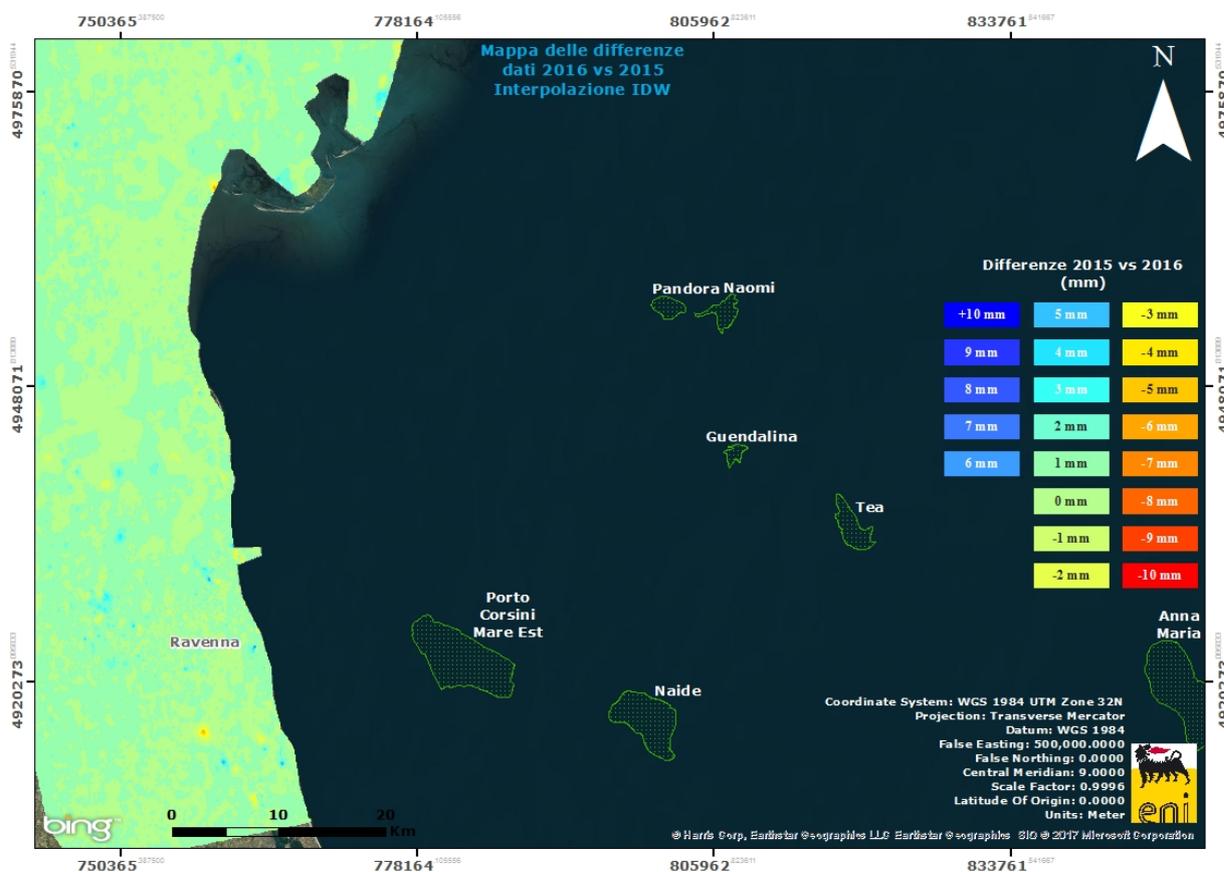


Fig. 5A – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Comacchio a Cervia

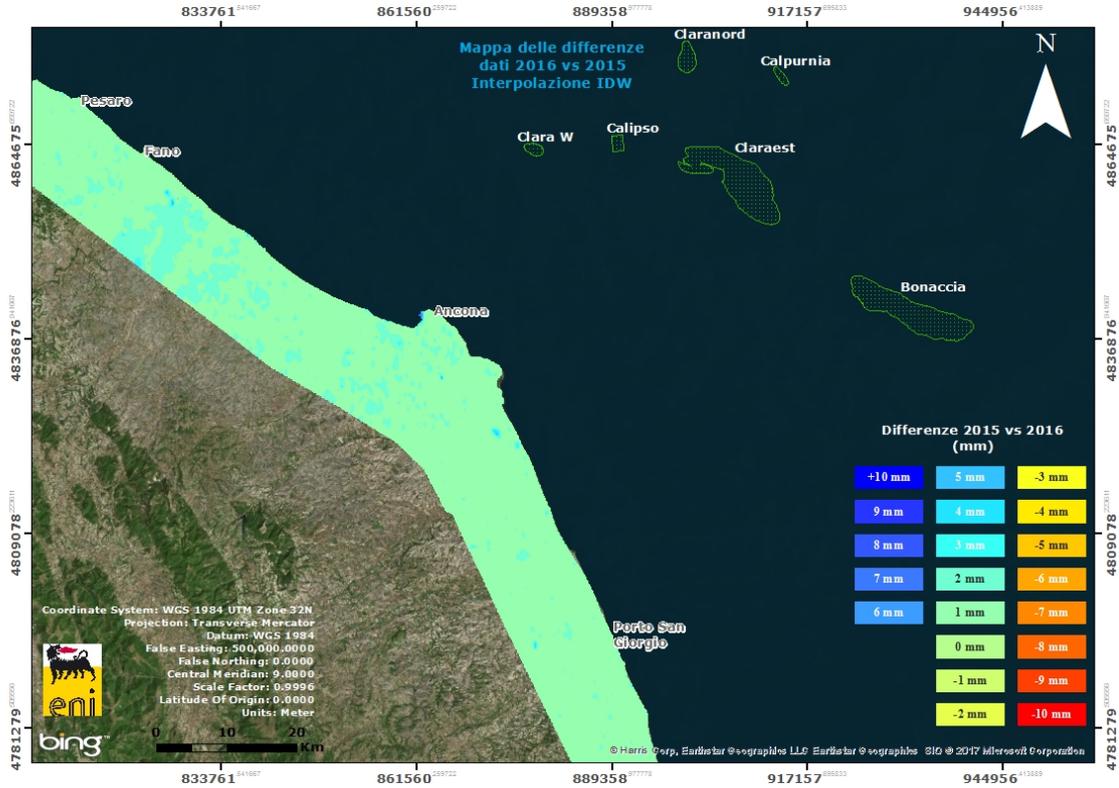


Fig. 6A - Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Fano a Porto San Giorgio



Appendice 2: stazioni EPSU lungo la fascia costiera compresa tra Comacchio e Cervia - aggiornamento dicembre 2016

Il monitoraggio della compattazione superficiale, lungo la fascia costiera adriatica compresa tra Comacchio e Cervia, è effettuato tramite 3 stazioni EPSU (Extensometric Piezometric Survey Unit) denominate: Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti. L'ubicazione di tali stazioni, installate tra il 1994 e il 1997, è riportata in figura 2A.

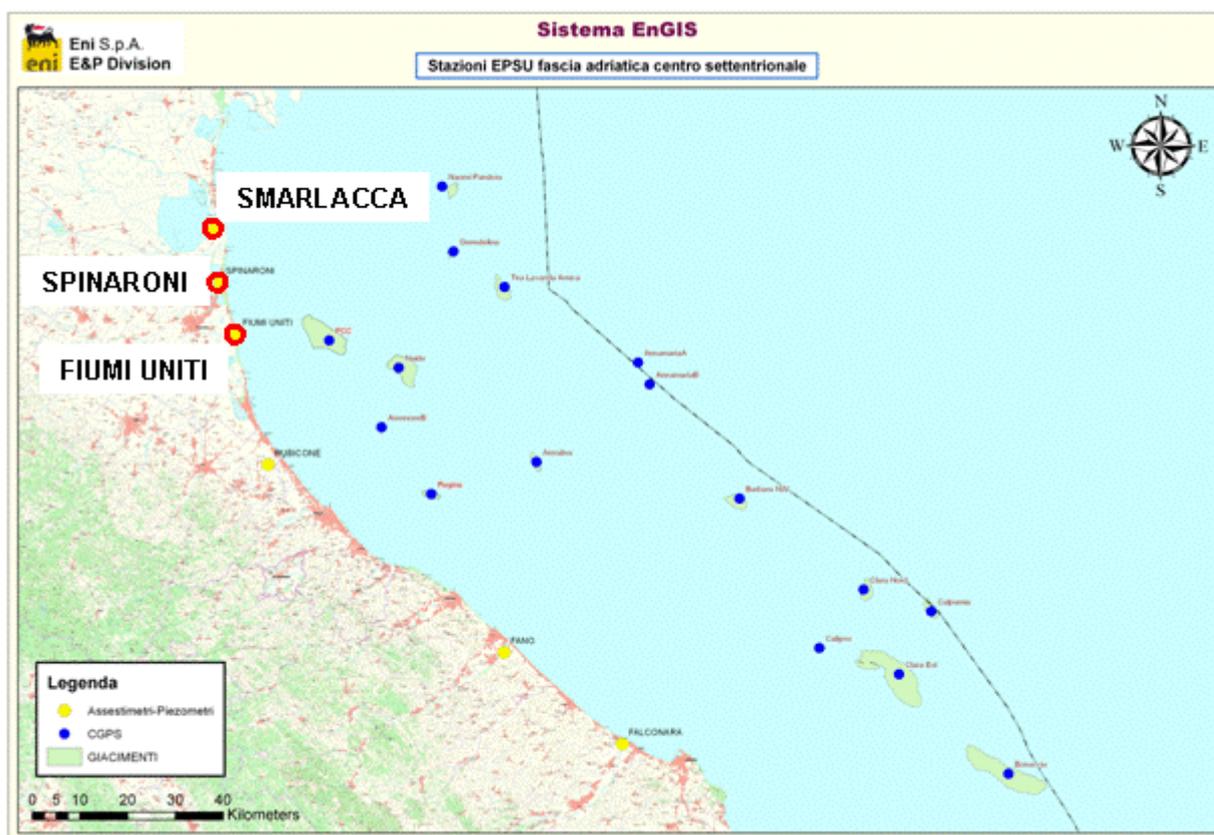


Figura 2A - Ubicazione delle stazioni EPSU

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

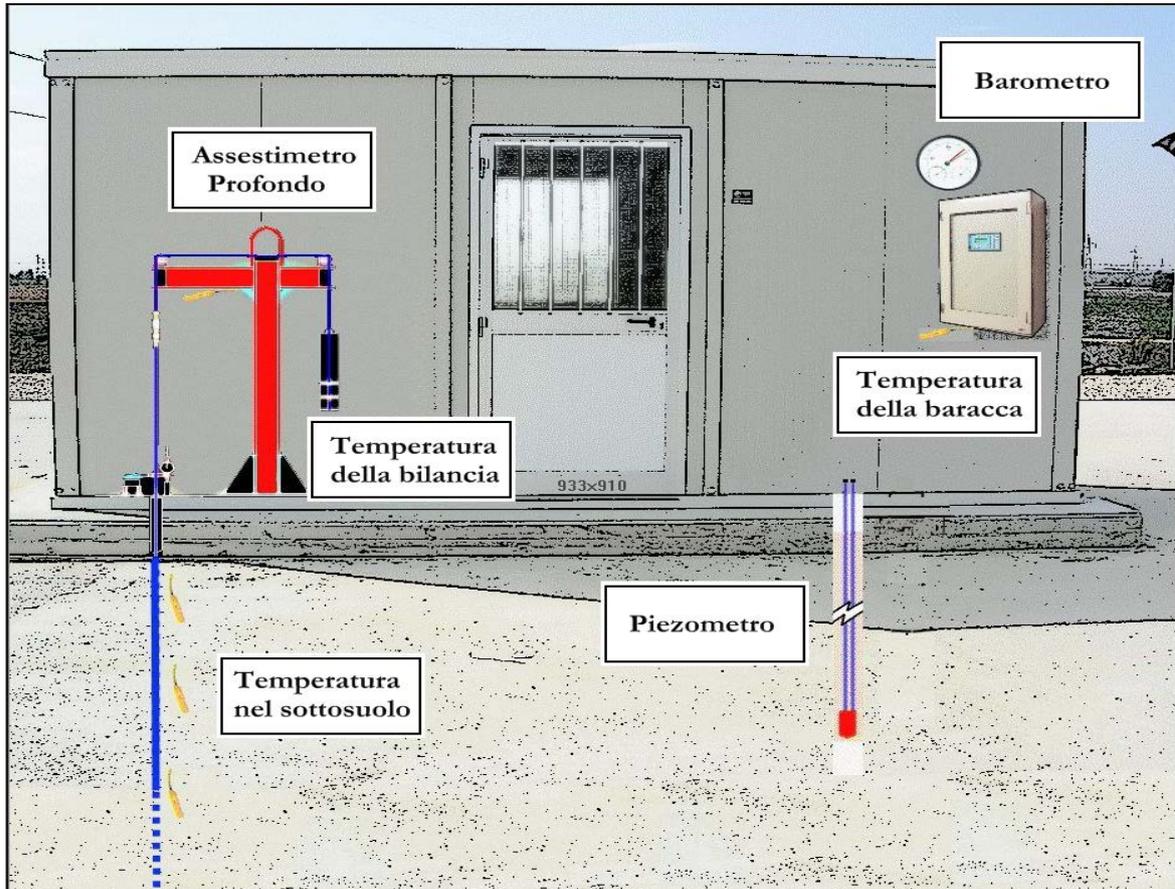


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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

| Località' | Pozzo | Strumentazione | Profondità' (da P.C.) | Data d'installazione |
|--------------------|-------|---------------------------|-----------------------|----------------------|
| Smarlacca | | Assestometro profondo | 334 m | Nov.1997 |
| | | Assestometro superficiale | 30 m | Nov.1997 |
| | | Piezometro profondo | 150,8 m | Nov.1997 |
| Spinaroni | | Assestometro profondo | 336 m | Nov.1997 |
| | | Piezometro profondo | 150,8 m | Nov.1997 |
| Fiumi Uniti | | Assestometro profondo | 372,85 m | Set. 1994 |
| | | Assestometro 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 |

| | | |
|--|--|-------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 39 - of 64 |
|--|--|-------------------|

Per ciascuna stazione EPSU si allegano:

1. scheda che evidenzia sinteticamente le principali caratteristiche;
2. grafico con tutti i dati registrati;
3. file in formato excel con tutte le misure.

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)

Strumentazione

- assestometro profondo - quota bottom 334,1 m da p.c.
- assestometro superficiale – quota bottom 29,5 m da p.c.
- piezometro- quota cella 150,8 m da p.c.

Questa stazione di misura è composta da una doppia verticale assestimetrica: l'assestometro profondo (33,15 metri d'asta di misura) e l'assestometro superficiale (29,5 metri d'asta di misura). L'installazione è avvenuta nel periodo 15 luglio 1997 - 20 ottobre 1997; il sistema è stato completato nel mese di novembre 1997 e collaudato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori di misura ("misura di zero").

All'interno del foro assestimetrico è stato installato 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. Sono in corso le attività per il suo ripristino.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestometro più profondo 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 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'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, valori 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'assestometro profondo un salto (corrispondente a una compattazione) di 2,7 mm in corrispondenza di un periodo di 72 giorni; tale evento compare, anche se in misura minore, nel grafico dell'assestometro superficiale. 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 rilevata anche dal GPS: nel grafico di confronto, infatti, le due curve mostrano le medesime modulazioni nello stesso periodo temporale. 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 m le cui misure si sono interrotte dal 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. Per entrambe le strumentazioni la velocità media di compattazione è, quindi, abbastanza simile, essendo risultata rispettivamente di ca. 0,3 mm/a (foro superficiale) e 1 mm/a (foro profondo). 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 (GPS 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 (> 334 m).

Si è fatto, inoltre, un confronto fra le misure assestimetriche (per comodità si sono riportate solo quelle registrate dalla strumentazione più profonda) e quelle GPS. 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 quello della curva GPS (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'assestometro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.

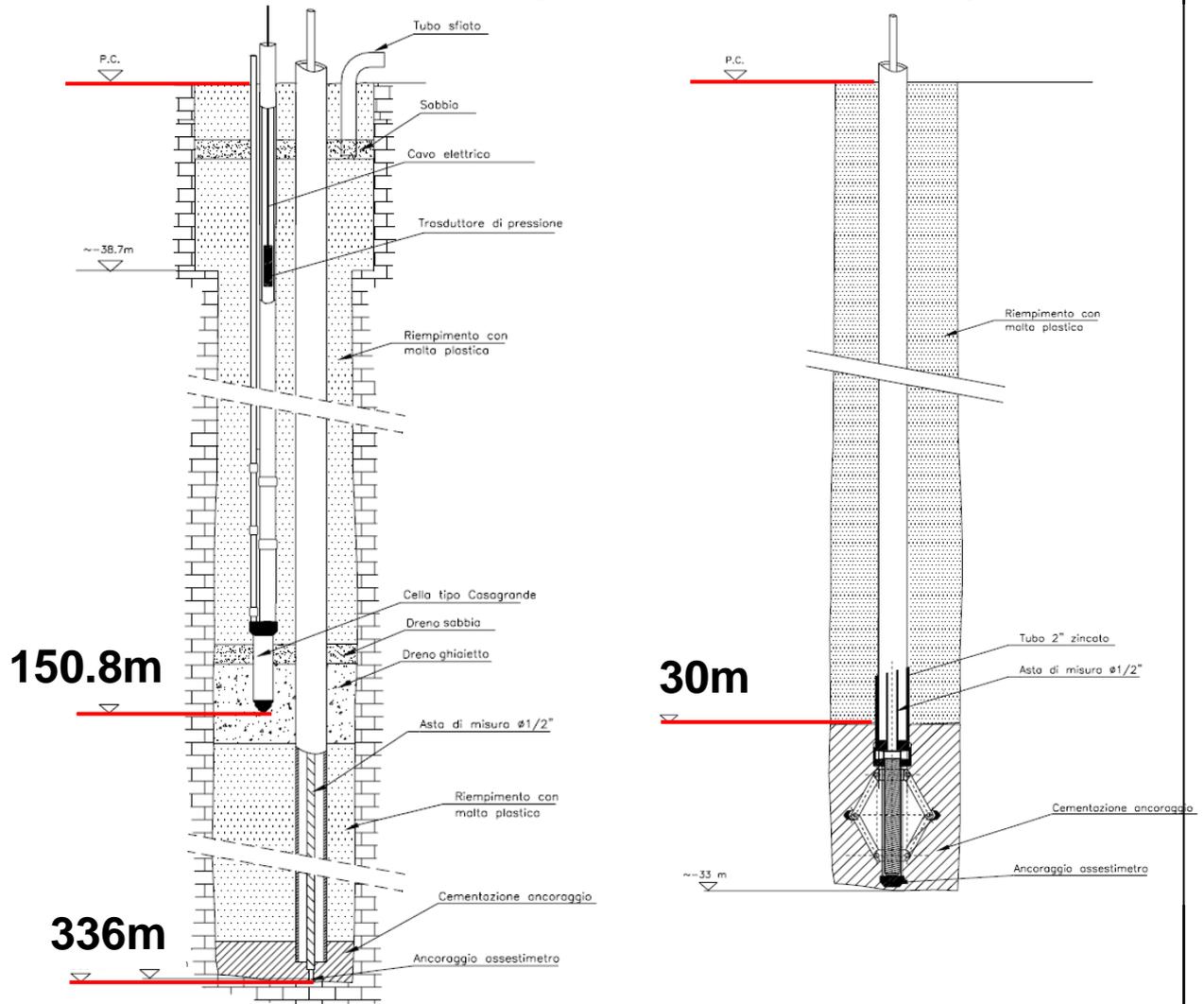


SMARLACCA

Piezometro

Assestimetro profondo

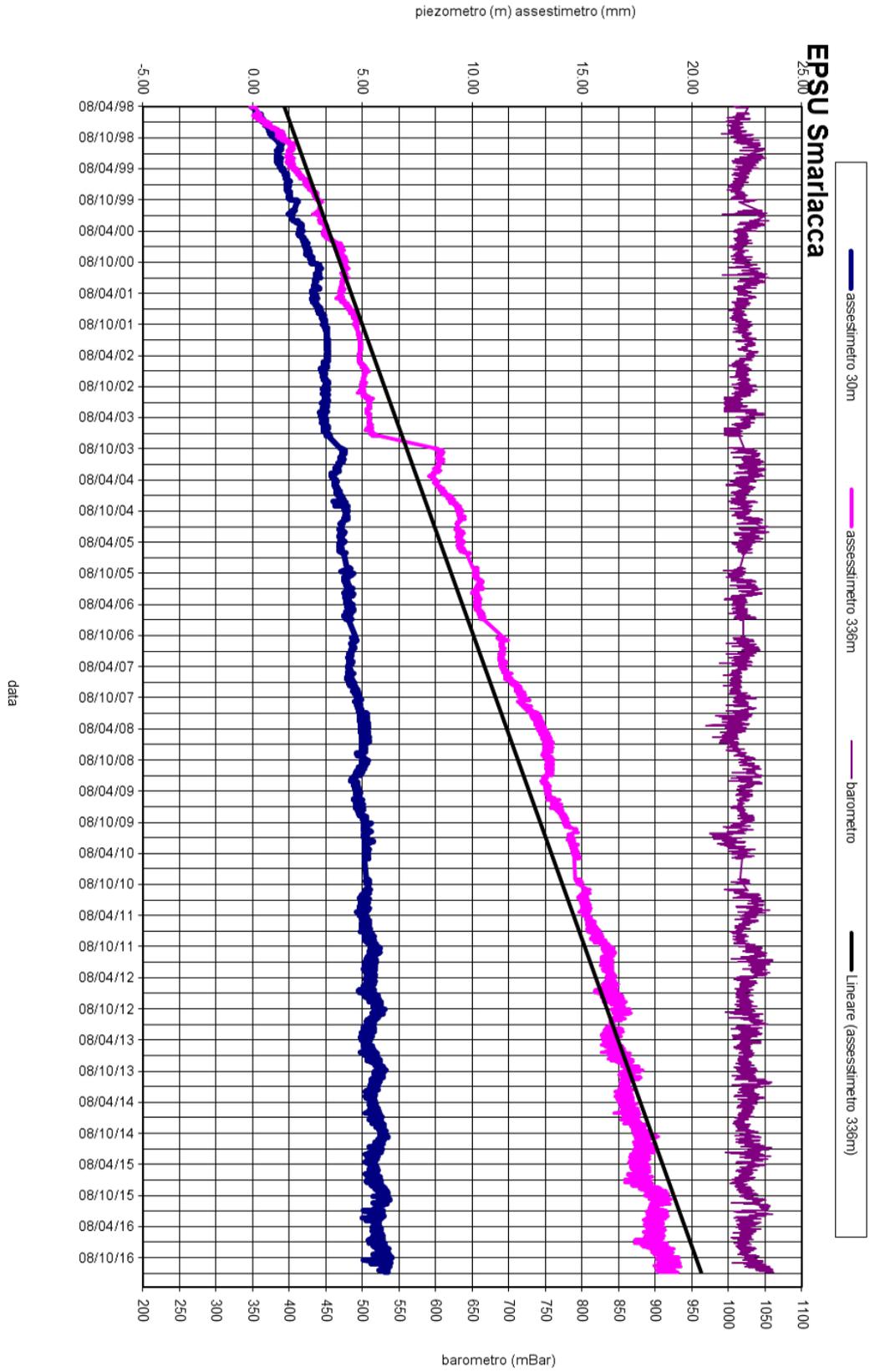
Assestimetro superficiale



non in scala

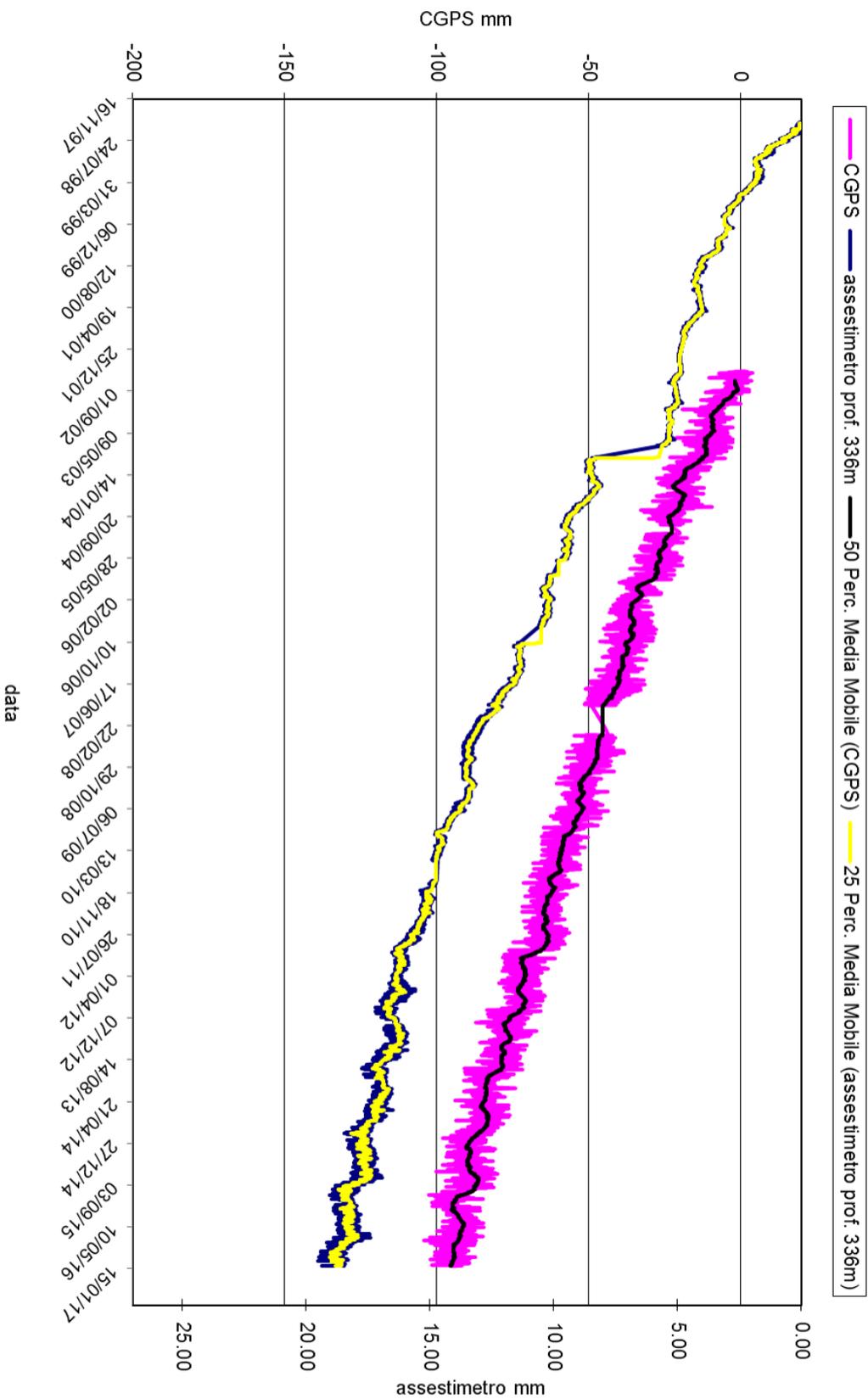


L'assestimento misura cedimenti del terreno rispetto all'ancoraggio profondo
valori positivi = abbassamento
valori negativi = sollevamento





SMARLACCA - Confronto GPS ed assestimetro profondo



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

| | | |
|---|--|-------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 46 - of 64 |
|---|--|-------------------|

Stazione EPSU di Spinaroni - (installata novembre 1997)

Strumentazione

- assestometro - quota bottom 336 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella 150,8 m da p.c.

L'installazione della verticale assestimetrica è stata fatta nel periodo 15 luglio 1997 - 20 settembre 1997; il 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 black-out 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 freatometro 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 della baracca.

A fine agosto 2008 si è spurgato il piezometro e al 30 settembre ne è stato fatto un controllo con sonda televisiva. A seguito di tale controllo lo strumento è stato considerato non attendibile per una probabile rottura del tubo di diametro più piccolo ($\varnothing 1/2"$). Sono in corso le attività per il suo ripristino.

Gli interventi sul piezometro hanno causato la perdita di 14 giorni di misure assestimetriche (dal 30 settembre al 14 ottobre 2008). Il giorno 14 ottobre si è ritarato il trasduttore di spo-

| | | |
|---|--|-------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 47 - of 64 |
|---|--|-------------------|

stamento, 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 registrazione 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 influenza sulla significatività della serie storica registrata.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro 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'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, valori 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 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 l'assestimetro ha, infatti, 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 con un trend più veloce di quello del periodo precedente l'anomalia sopracitata. Dopo la metà 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 19 anni di osservazioni. In questi anni si è registrata una compattazione totale di 48,8 mm corrispondente a una velocità media

annua di 2,5 mm/a, che mantiene, dopo il primo anno di assestamento, un andamento abbastanza regolare nel tempo a (parte l'anomalia sopra segnalata). Nella 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 circa -7,4 mm/a.

Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (GPS 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 (> 336 m).

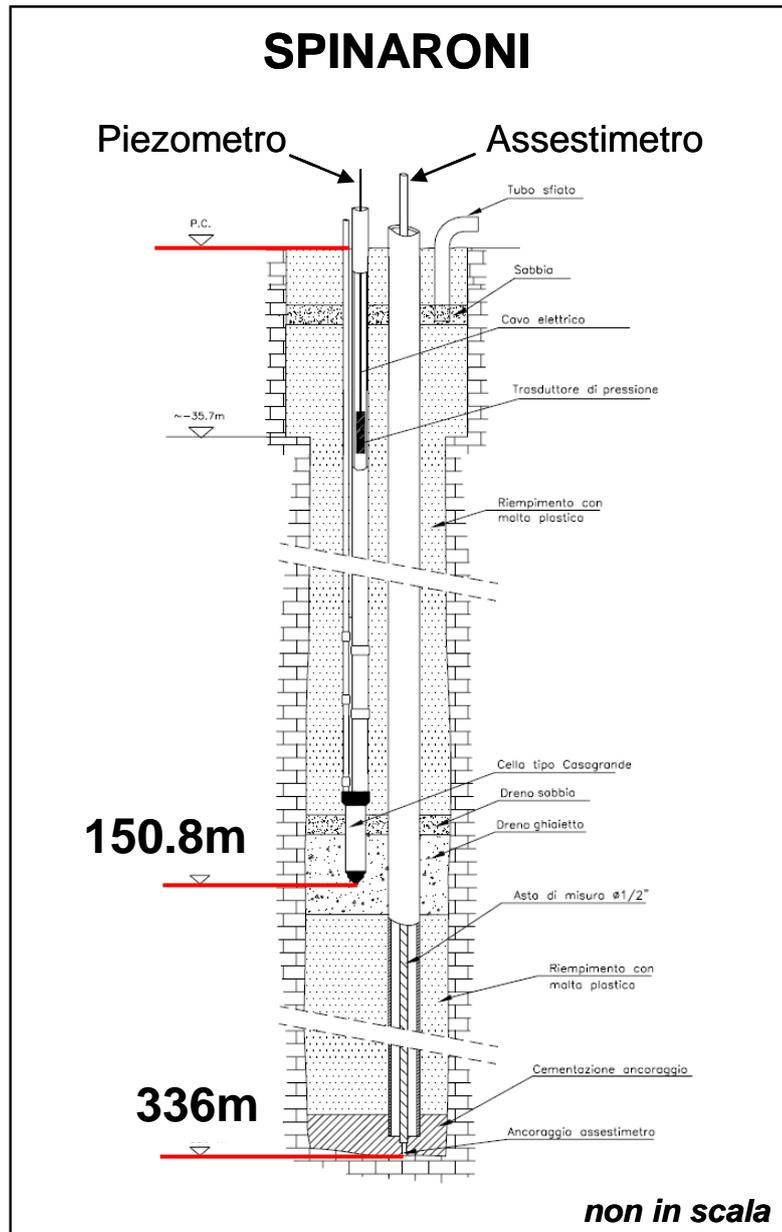
La correlazione nel tempo dell'andamento delle due curve (geodetica GPS e assestimetrica) non è molto elevata come mostrato nel grafico allegato; le misure GPS presentano un andamento più regolare con una dinamica legata alla stagionalità. Nel periodo tra inizio ottobre 2003 sino a oltre la metà del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

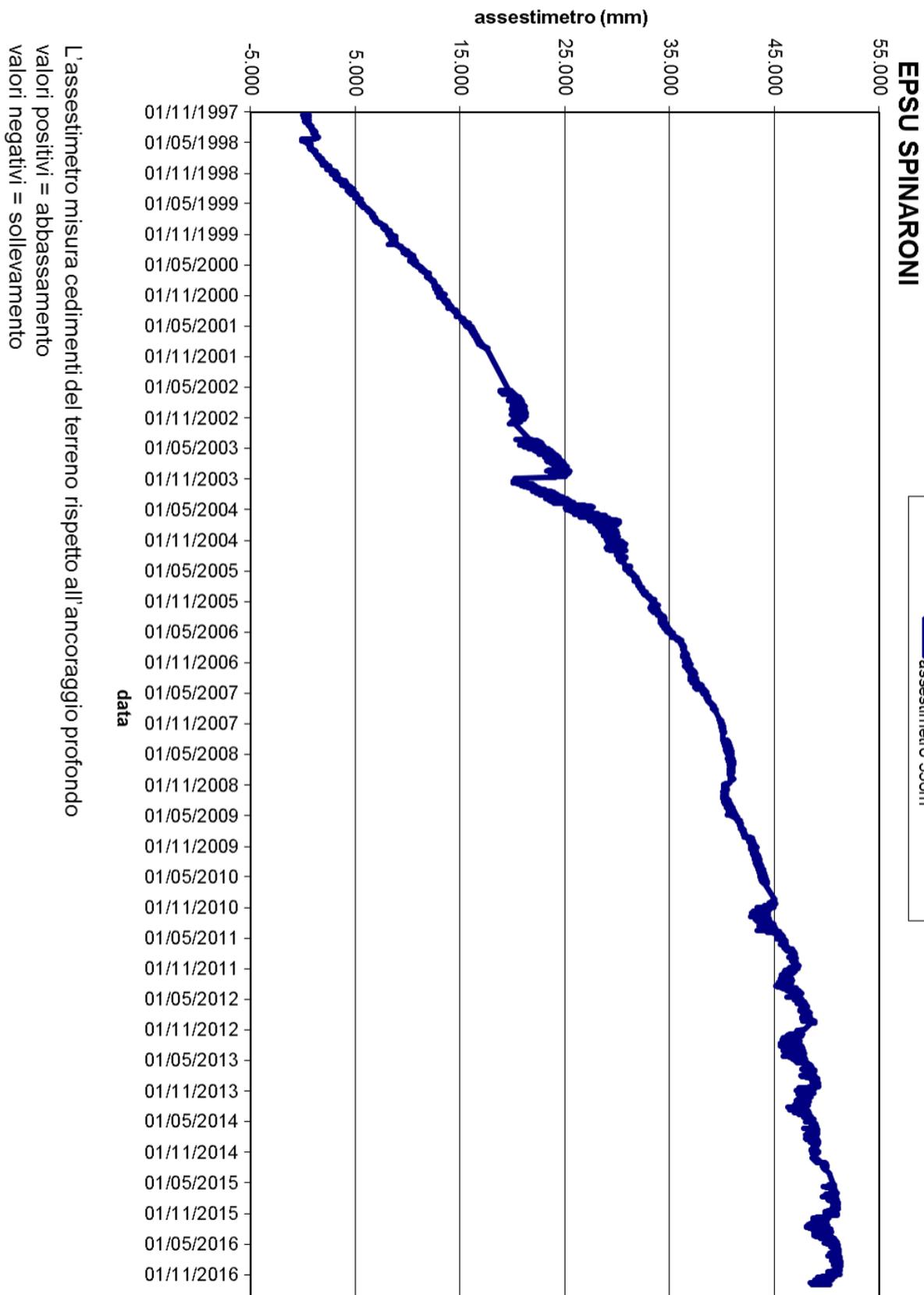
Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico:

- 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 GPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

Analisi dei dati piezometrici

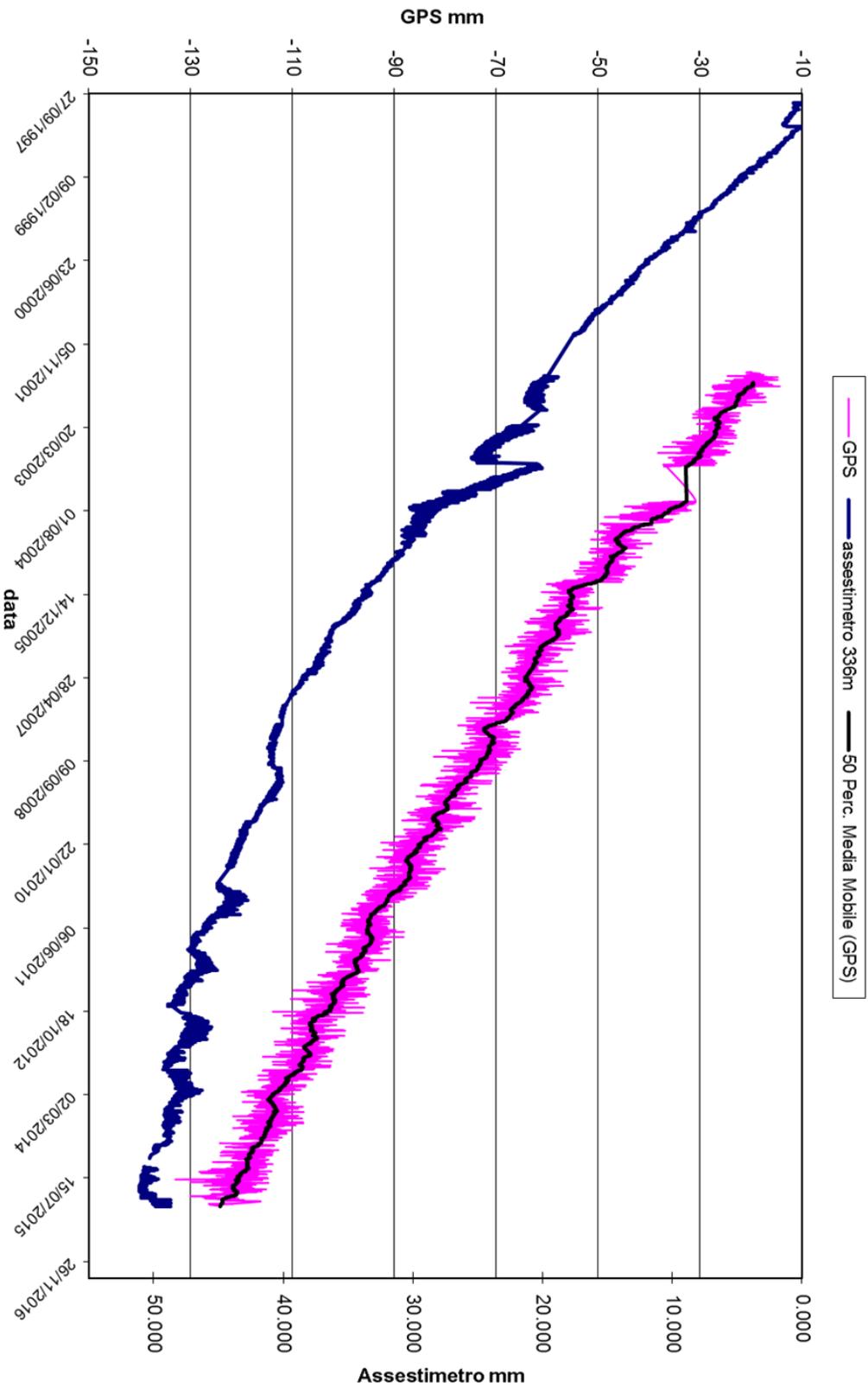
Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e, pertanto, di scarsa utilità. Anche per questa stazione, quindi,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







SPINARONI - Confronto GPS ed assestimetro profondo



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

Stazione EPSU di Fiumi Uniti (installata settembre 1994)

Strumentazione

- assestometro profondo - quota bottom 372,85 m da p.c.
- assestometro 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)

Nel dicembre 2011 presso l'area Fiumi Uniti sono stati aggiunti i seguenti nuovi piezometri:

| Sigla | Profondità (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. |

Questa stazione assestimetrica è stata completata nel settembre 1994.

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.

| | | |
|---|--|-------------------|
|  eni spa | Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA settembre 2017 | Page - 53 - of 64 |
|---|--|-------------------|

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 dal luglio 2011 sono stati definitivamente sigillati i 3 vecchi tubi piezometrici. Nel dicembre 2011 sono entrati in funzione i tre 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 ri-scalato 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 dicembre 2016 la registrazione dei dati è stata poi regolare.

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; 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 (p.c.).

Nei grafici allegati 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, valori 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 traduttori di spostamento, precisamente di 16,3 mm per l'assestimetro 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 i circa 22,3 anni di misure fatte, le due curve assestimetriche 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/a 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 -14,2 mm/a. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (GPS 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).

L'esame delle curve GPS e assestimetrica profonda non rivela, poi, particolari tratti di somiglianza fra le stesse, come si può osservare nel grafico allegato.

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 (2002-2015), pur essendo la durata del monitoraggio con l'assestimetro 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 GPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

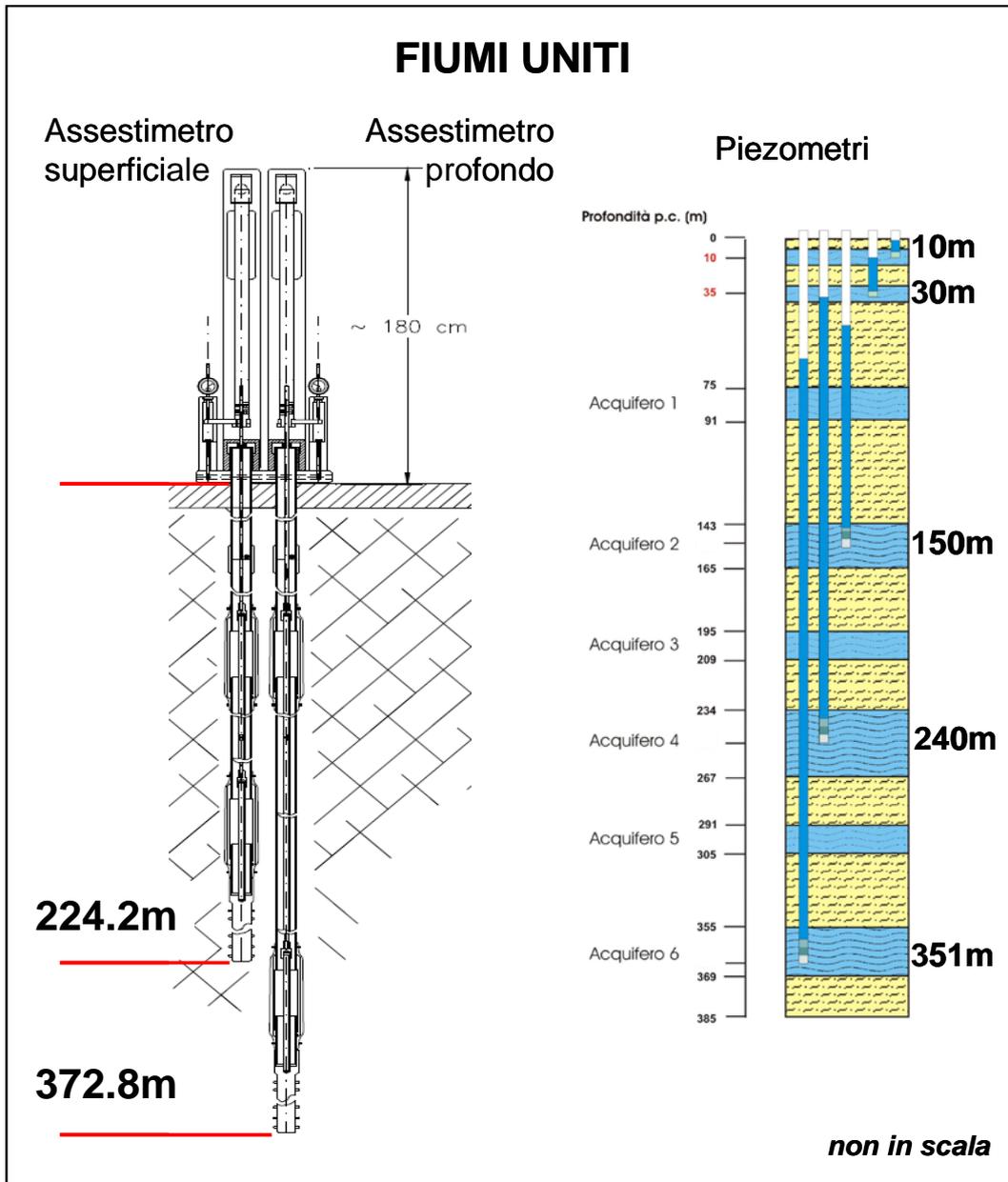


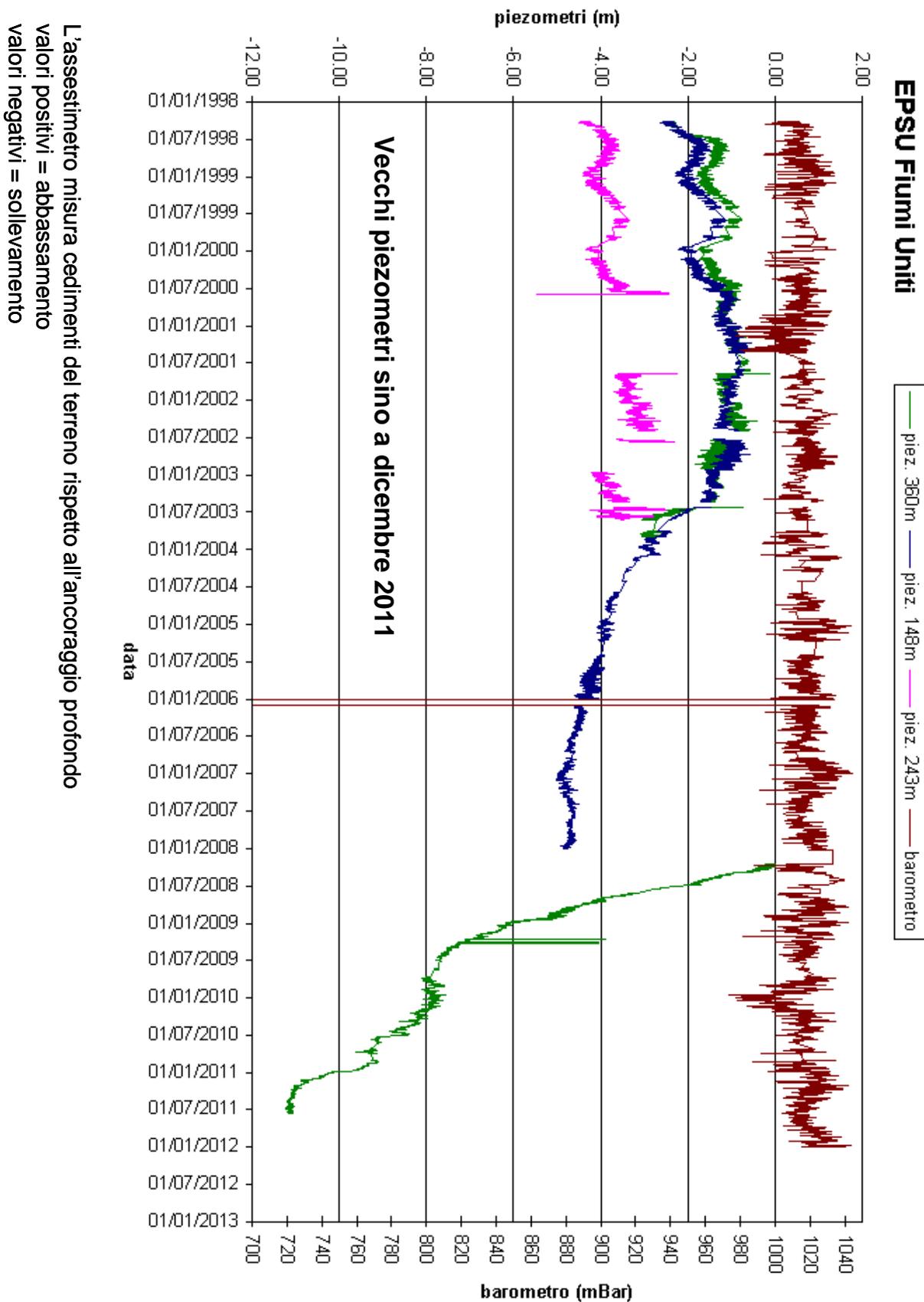
Analisi dei dati piezometrici

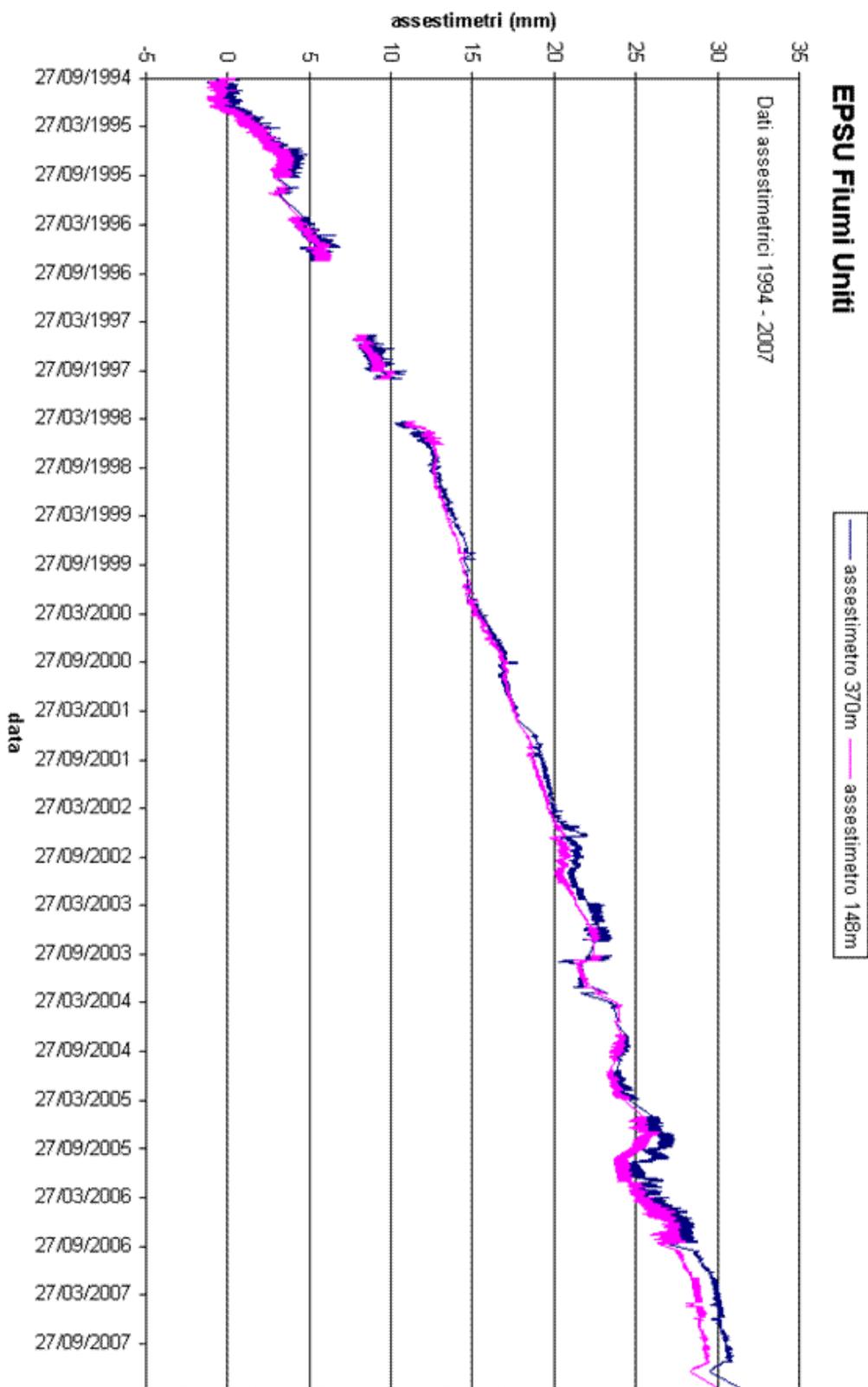
Come spiegato in precedenza, nella stazione sono stati posti inizialmente in opera tre verticali piezometriche che, però, nel corso del tempo si sono guastate. Per un lungo periodo di tempo, quindi, le misure piezometriche utilizzate sono state solo quelle relative al piezometro più profondo, ritenuto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

Da metà luglio 2011 tutti i vecchi tubi piezometrici sono stati poi definitivamente sigillati e dal 22 dicembre 2011 si sono resi disponibili i dati dei nuovi tubi piezometrici.

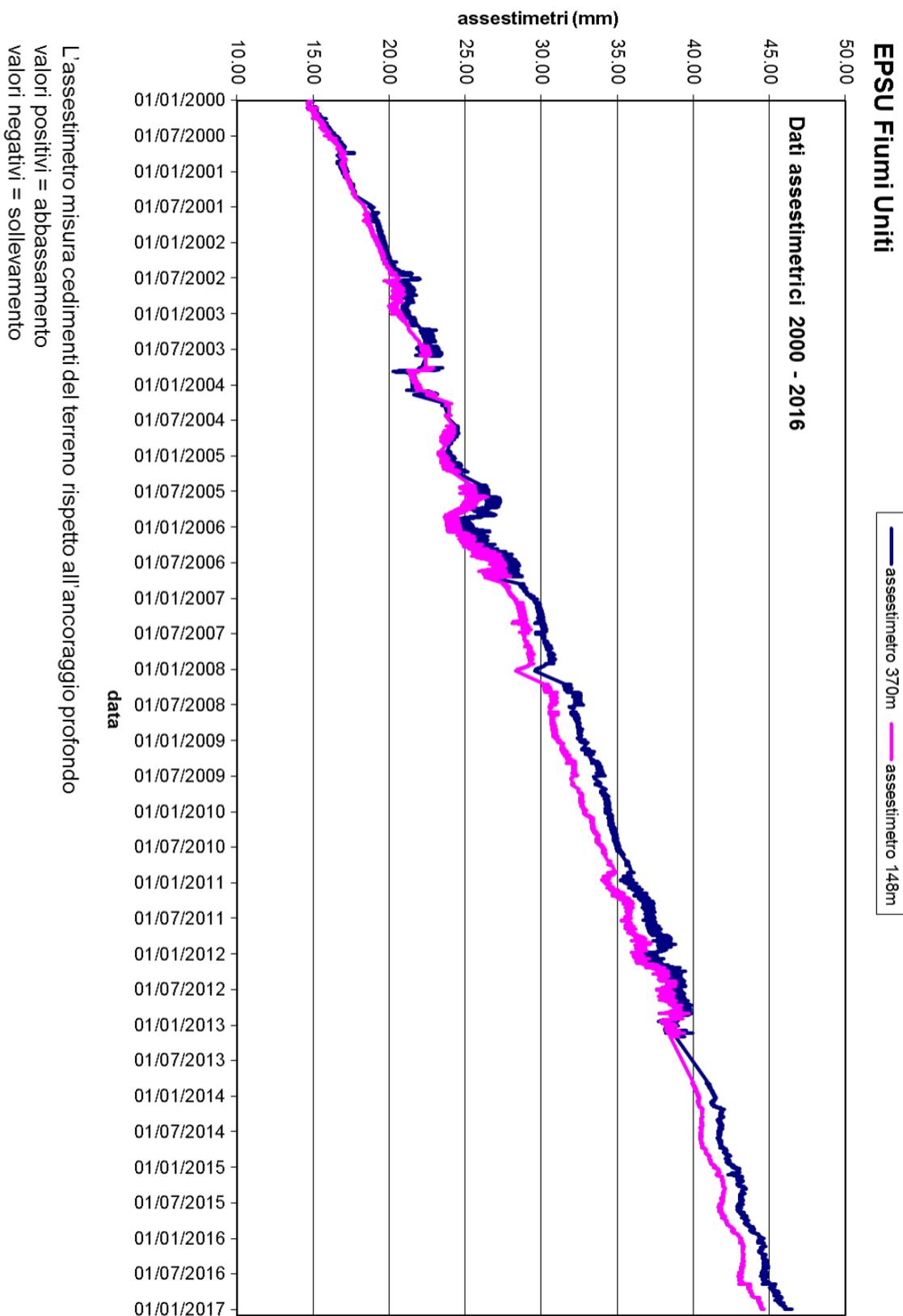
A dicembre 2016 si sono fatti gli ultimi controlli manuali del livello delle falde acquifere, accertando una buona rispondenza con le misure automatiche. Tutti i trasduttori si sono, quindi, dimostrati perfettamente funzionanti e affidabili.

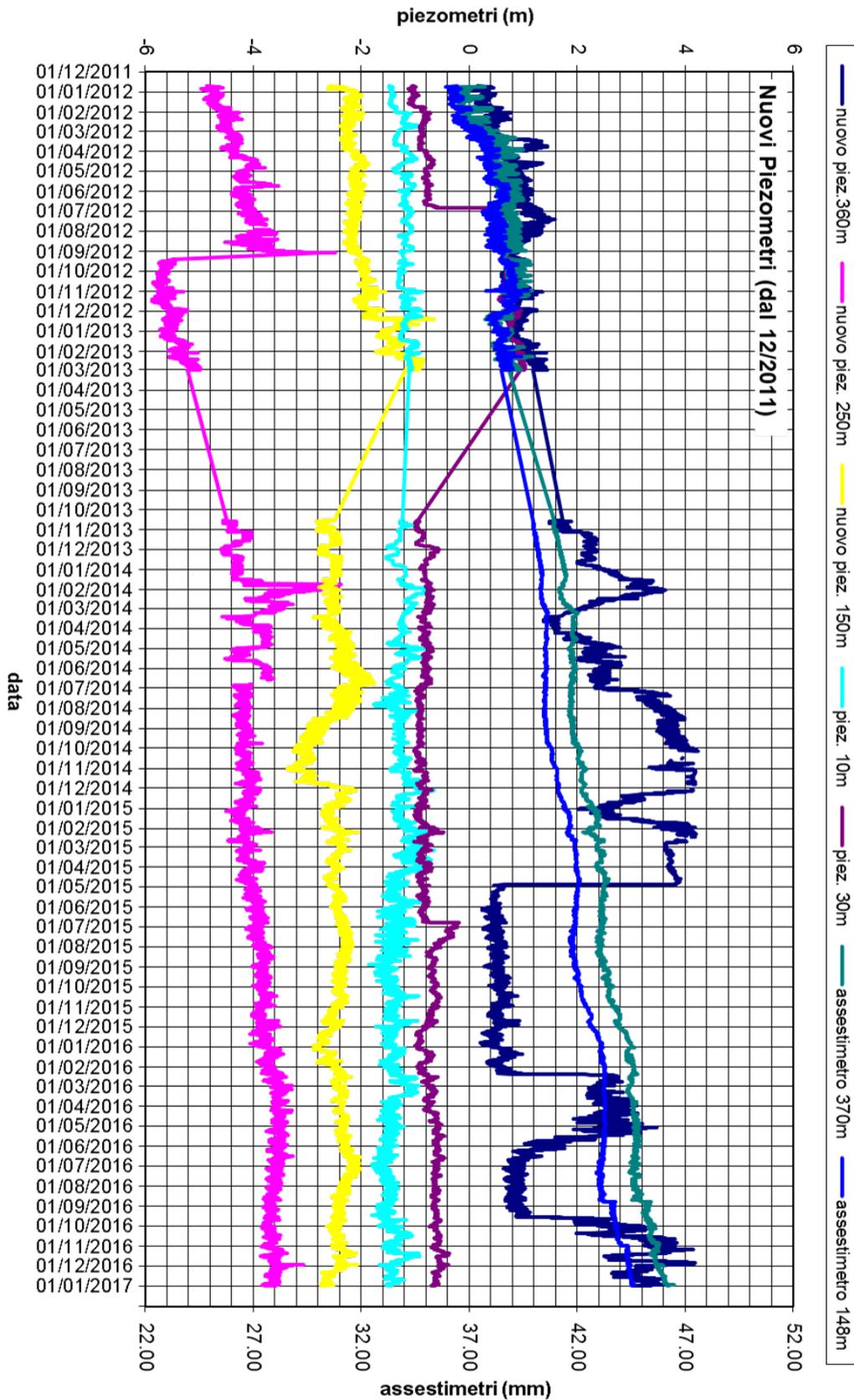


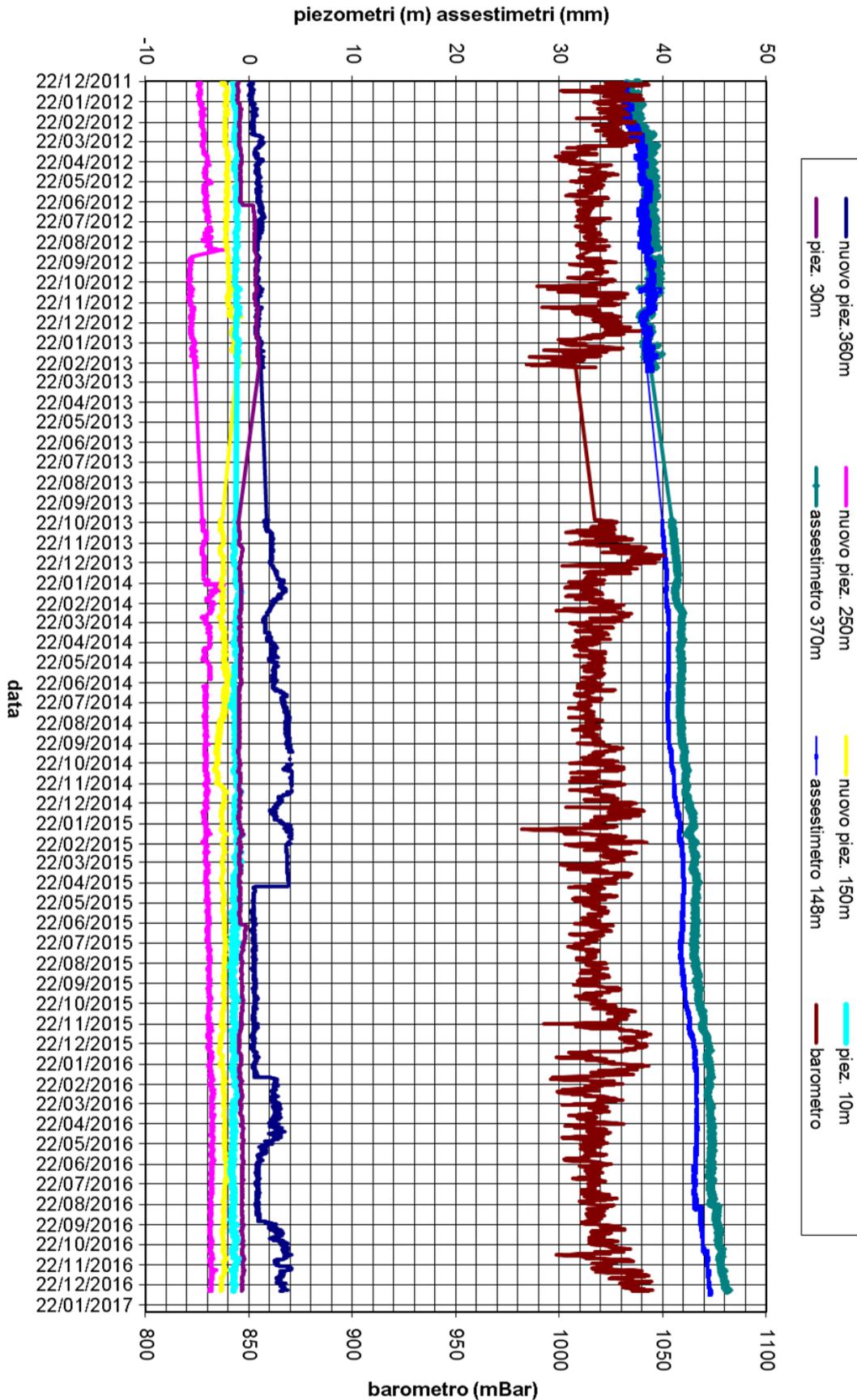




L'assestimetro misura cedimenti del terreno rispetto all'ancoraggio profondo
valori positivi = abbassamento
valori negativi = sollevamento

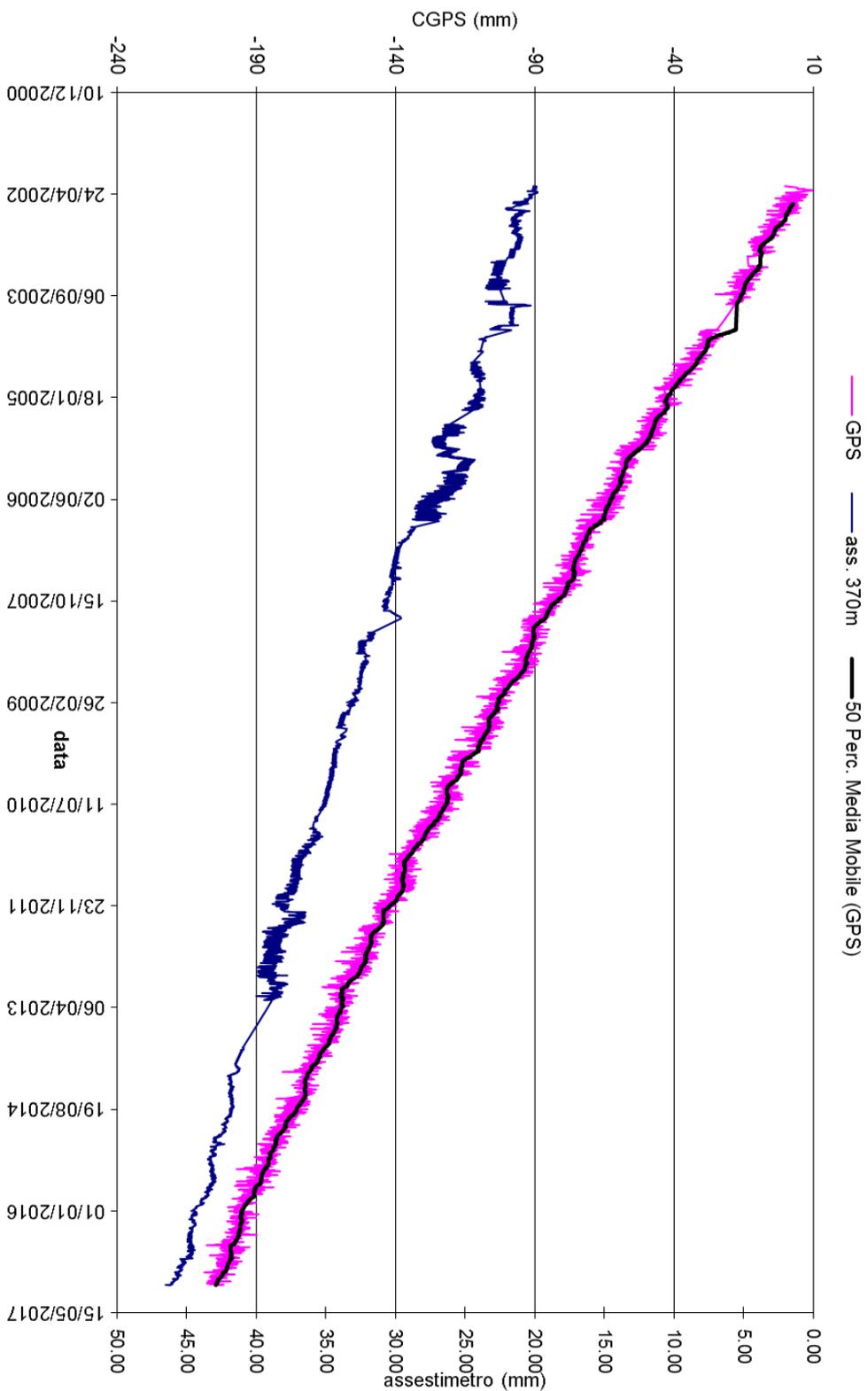








FIUMI UNITI - Confronto GPS ed assettimetro profondo



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



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 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.

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 velocità che tende lievemente a diminuire. Negli ultimi 4 anni, infatti, si sono registrati per tutti gli assestimetri valori di detta velocità leggermente decrescenti (da 0,1 a 0,5 mm/a) rispetto al passato.

Smarlacca

Per la stazione di Smarlacca il periodo di osservazione è di circa 18,7 anni, durante i quali l'assestometro più profondo ha registrato una compactazione 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 19,0 mm (mediamente ca. 1,0 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 (6,1 mm complessivi, corrispondenti mediamente a circa 0,3 mm/a).

Buona è la correlazione tra la curva assestometrica e quella del GPS.

Spinaroni

Per la stazione di Spinaroni si hanno a disposizione circa 19,1 anni di osservazioni durante i quali si è registrata una compactazione di 48,8 mm (mediamente circa 2,5 mm/a) 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.

La correlazione dell'andamento nel tempo delle curve GPS e assestimetrica non è molto elevata; il GPS 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 che non nelle due stazioni sopracitate.

Il valore attuale – dicembre 2016 - della compattazione totale misurata in tutti questi anni dall'assestometro più profondo è di 46,2 mm, mentre per quello superficiale detto valore è di ca. 44,6 mm. Ciò significa che, assumendo un trend di compattazione del terreno costante nell'arco di circa 22,3 anni d'osservazione, entrambi gli strumenti hanno registrato velocità media di compattazione praticamente simili e mediamente dell'ordine di circa 2 mm/a.

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

Nella seguente tabella sia la compattazione complessiva del terreno, sia la relativa velocità media annua sono state valutate sulla base della misura assestimetrica ottenuta al 31/12/2016 e degli anni complessivi 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.

| Stazione | Anni d'osservazione | Assestometro profondo | | Assestometro superficiale | |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| | | Compattazione complessiva (mm) | Velocità (mm/a) | Compattazione complessiva (mm) | Velocità (mm/a) |
| Smarlacca | 18,7 | 19,0 | 1,0 | 6,1 | 0,3 |
| Spinaroni | 19,1 | 48,8 | 2,6 | - | - |
| Fiumi Uniti | 22,3 | 46,3 | 2,1 | 44,6 | 2,0 |