

## Campo di GUENDALINA

Aggiornamento al 31/12/2018

Il campo di Guendalina è ubicato nell'offshore adriatico a circa 47 Km dalla costa romagnola, in corrispondenza di un fondale marino di circa 42 m e ricade nella concessione di coltivazione A.C35.AG, Eni al 80% e Rockhopper al 20% (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C35.AG	25/11/2022	Eni	Eni Rockhopper	80% 20%	Emilia-Romagna

Il giacimento è costituito da una serie di livelli mineralizzati compresi fra i 3000 e i 3080 msl e appartenenti alla F.ne P. Garibaldi, che si sono depositati in onlap progressivo delle facies torbiditiche lungo un canyon inciso nel substrato pre-pliocenico.

La trappola è di tipo misto (stratigrafico – strutturale): i livelli, infatti, risalgono in updip verso l'unconformity (in direzione NE) con la chiusura che avviene per *pinch-out* sulla F.ne Clara ("facies impermeabile") per i tre lati della parete del canyon e per pendenza in direzione *downdip*.

Il giacimento è stato scoperto dal pozzo esplorativo Guendalina 1, perforato nel 1998 nel permesso A.R88.FR. L'attuale concessione (A.C35.AG) è stata conferita con decorrenza 25/11/2002 per un periodo di 20 anni e ha scadenza al 25/11/2022.

Il pozzo esplorativo Guendalina 1 ha trovato mineralizzato a gas il livello PL3-J3 della formazione Porto Garibaldi (Figura 2). Per valutare l'estensione di tale mineralizzazione e la potenzialità produttiva della scoperta, è stato eseguito il *side-track* Guendalina 1dirA con uno scostamento di 350 m in direzione NE. Tale *side-track*, oltre a confermare l'estensione areale del livello PL3-J3, ha trovato mineralizzato a gas anche il PL3-I1 e altri due livelli d'interesse minerario minore (PL3-J e PL3-J1). Su entrambi i pozzi Guendalina 1 e Guendalina 1 dirA sono stati registrati log elettrici e misure di pressione RFT; il livello PL3-J3 è stato provato sul pozzo Guendalina 1. I due pozzi esplorativi sono stati poi chiusi minieralmente. In data 30 gennaio 2001 è stata presentata da Eni istanza per l'assegnazione di concessione, cui il CTIG ha dato parere favorevole il 20 dicembre 2001. Il 26 ottobre 2006

Eni ha inoltrato un'istanza di variazione del programma lavori di sviluppo per l'allacciamento della piattaforma Guendalina alla piattaforma Tea.

Nel documento SIA, presentato da Eni il 21/11/2007, è riportato il profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse* 3D) del luglio 2007.

Tale profilo prevedeva il recupero di 757 MSm<sup>3</sup> in 10 anni con una graduale chiusura dei pozzi per elevata produzione d'acqua. La portata di picco giornaliera di gas era stimata in circa 500 kSm<sup>3</sup>/g. Nell'elaborazione del profilo si era considerata anche la messa in produzione del livello PL3-K che era stato individuato da un'evidente anomalia d'ampiezza presente nei tracciati sismici. Tale livello non era stato, però, raggiunto dai pozzi esplorativi e il suo GOIP, pertanto, era stato classificato solo come possibile. Il pozzo di sviluppo Guendalina 3 lo ha attraversato per circa 11 m; il livello è risultato mineralizzato a gas come previsto, ma con saturazione in acqua così alta da sconsigliarne il completamento e la messa in produzione. I due pozzi di sviluppo del campo Guendalina 2 dir e Guendalina 3 sono stati perforati e aperti alla produzione nell'ottobre 2011 utilizzando una piattaforma di tipo BEAF. La string lunga del pozzo Guendalina 2 dir è stata adibita al monitoraggio in situ della compattazione profonda tramite l'installazione in formazione di *marker*, il cui rilievo base è stato registrato nel giugno 2011.

Durante la fase di sviluppo del campo è stata fatta, altresì, una campagna d'acquisizione dati (RFT di pressione, carote di fondo, logs, prove di permeabilità, ecc.) da utilizzarsi per la caratterizzazione petrofisica e geomeccanica della copertura e della roccia serbatoio dei livelli mineralizzati nei futuri aggiornamenti dei modelli (giacimento e geomeccanico).

Nel 2013 a seguito di un progressivo peggioramento dei parametri erogativi (portate, pressioni di testa) si è chiusa spontaneamente alla produzione la *string* corta del pozzo Guendalina 2 dir. Le verifiche successive hanno confermato che anche l'accessibilità della *string* lunga adibita al solo monitoraggio della compattazione (FSMT – *Formation Subsidence Monitoring Tool*) era stata compromessa. Sono stati fatti in seguito numerosi tentativi per ripristinare sia la produzione, sia l'accessibilità del pozzo Guendalina 2 dir con risultati sempre negativi. Per il ripristino della produzione e la ripresa del monitoraggio *in-situ* della compattazione si è, pertanto, perforato nel corso di un *work-over* (settembre 2015) un nuovo *side-track* (ST Guendalina 2 dirA) in cui si sono installati nuovi *markers*, dei quali si è registrato il rilievo base. Il foro Guendalina 2 dir è stato poi chiuso minerariamente.

Nel 2014 si sono rivisti i modelli statico e dinamico del campo di Guendalina (“*rel n°03-14 GISE del marzo 2014 - Campo di Guendalina – Revisione Studio di Giacimento*”), utilizzando anche le informazioni acquisite durante lo sviluppo del campo.

Obiettivi del lavoro sono stati:

- rivalutare il potenziale minerario dei livelli della serie PL3;
- aggiornare i profili di produzione e le riserve del campo alla luce della storia produttiva sin qui acquisita;
- verificare se il piano di sviluppo in essere fosse tale da ottimizzare il recupero di gas.

Nel corso della revisione dello studio si è già considerato l'intervento di *side-track* sul pozzo Guendalina 2 dir che, come detto in precedenza, è stato poi fatto nel 2015 (Guendalina 2 dirA). Con il nuovo profilo di produzione si è stimato un recupero di 721 MSm<sup>3</sup> al 2023 con una diminuzione delle riserve, quindi, di circa il 5% rispetto alla valutazione precedente.

Il modello fluido-dinamico Eclipse del campo di Guendalina è stato, quindi, nuovamente aggiornato nel corso del 2018 (“*rel. IPET-4DC25805-0, Campo di Guendalina - Studio Integrato di giacimento*” – ottobre 2018), aggiornando l'History Match con le produzioni mensili storiche fino a maggio 2018 al fine di riprodurre correttamente sia la storia produttiva che le pressioni statiche dei livelli del reservoir. Inoltre, si è proceduto alla verifica e alla conferma dei profili di produzione e delle riserve associate.

Con il nuovo profilo di produzione si è stimato un recupero di 902 MSm<sup>3</sup> al 2022 (scenario di produzione **DN**) con un incremento delle riserve, quindi, di circa il 25% rispetto alla valutazione precedente.

In Figura 3 è riportato l'andamento storico della produzione di gas del campo (kSm<sup>3</sup>/g), e di acqua (m<sup>3</sup>/g). In Figura 4, Figura 5 e Figura 6 è riportato, invece, il confronto tra la produzione reale annuale e cumulativa e quella prevista dal modello Eclipse 2018.

Al 31/12/2018 la produzione cumulativa del campo è pari a 761 MSm<sup>3</sup>.

In Figura 7 è presentato il confronto tra i profili di pressione calcolati (modelli *Eclipse* del marzo 2014) e le pressioni registrate nei livelli principali del campo (PL3-I1 e PL3-J3) che mostra un buon match tra le previsioni modellistiche e le misure eseguite.

Per valutare quantitativamente l'entità d'eventuali fenomeni di subsidenza connessi allo sviluppo del campo di Guendalina, si sono aggiornate nel tempo le previsioni modellistiche originariamente elaborate nel modello geomeccanico a Elementi Finiti (modello FEM elasto-plastico) del luglio 2007. Sulla base di nuovi dati di giacimento e di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, nel corso del 2018 si è aggiornato il modello geomeccanico del campo di Guendalina ("rel. *REIT-IPET FF06109A-0 - Campo di Guendalina – Modello Elasto-Plastico di subsidenza – Management Summary*", novembre 2018).

Nel corso di tale studio si sono presi in esame 4 differenti scenari produttivi di forecast per i quali è previsto che la produzione termini nel 2022:

- caso *Do Nothing* (DN): la configurazione delle 4 string attualmente in produzione (Guendalina 3C/L, Guendalina 2DirA C/L) rimane invariata;
- caso *Do Nothing + livello PL3-J* (DN\_J): apertura a dicembre 2018 del selettivo sulla string lunga di Guendalina 3 con produzione del livello PL3\_J in commingle con il livello PL3-J3;
- caso *Do Nothing + lower sealine pressure* (DN\_MINP): riduzione della pressione di network a gennaio 2019 dagli attuali 20 bar a 8 bar;
- caso *Do Nothing + livello PL3-J3 + lower sealine pressure* (DN\_J\_MINP): apertura a dicembre 2018 del selettivo sulla string lunga di Guendalina 3 con produzione del livello PL3\_J in commingle con il livello PL3\_J3 e riduzione della pressione di network a gennaio 2019 dagli attuali 20 bar a 8 bar.

Per lo scenario di produzione considerato come riferimento (DN\_J\_MINP) sono stati simulati 3 scenari di compressibilità dei sedimenti, denominati rispettivamente Upper, GPS e 2Upper, calibrati affinché i risultati del modello geomeccanico riproducessero le misure di spostamento registrate dal CGPS sulla piattaforma di Guendalina. Per gli altri scenari di produzione è stata realizzata la simulazione geomeccanica solo per lo scenario di compressibilità GPS.

I risultati delle previsioni di subsidenza sono riportati in Tabella 1, dove sono stati indicati sia i valori di massima subsidenza sia l'estensione del fenomeno ad alcune date significative come il termine di produzione (2022) e la fine simulazione (2055). Si ricorda, infatti, che le simulazioni sono state protrate a pozzi chiusi dopo la fine della produzione in modo da

considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero (Figura 8).

**Tabella 1 – Massima subsidenza ed estensione del fenomeno per gli scenari considerati**

Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	Fine produzione (2022)		Fine simulazione (2055)	
		subsidenza (cm)	estensione (km)	subsidenza (cm)	estensione (km)
DN	GPS	-6.1	2	-7.9	3
DN_MINP	GPS	-6.2	2	-8.2	3
DN_J	GPS	-6.2	2	-8.2	3
DN_J_MINP	Upper	-4.7	2	-6.2	3.5
DN_J_MINP	GPS	-6.4	2	-8.5	3.5
DN_J_MINP	2Upper	-7.4	3	-9.8	4

L'analisi dei risultati per lo scenario dinamico di riferimento DN\_J\_MINP e di compressibilità GPS consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza previsto è pari a 6.4 cm a fine produzione e a 8.5 cm a fine simulazione (Figura 8);
- il fenomeno si esaurisce a circa 45 km dalla linea di costa a fine produzione (Figura 9);

L'analisi dei risultati per lo scenario dinamico di riferimento DN\_J\_MINP e di compressibilità più elevata 2Upper consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza previsto è pari a 7.4 cm a fine produzione e a 9.8 cm a fine simulazione (Figura 8);
- il fenomeno si esaurisce a circa 43 km dalla linea di costa a fine simulazione (Figura 10);

In generale, per tutti i casi considerati, il fenomeno si esaurisce sempre a oltre 40 km dalla linea di costa a fine simulazione.

In ottemperanza alle prescrizioni del DEC/VIA n.0009995 del 22 aprile 2009 in merito alla “Stima e monitoraggio dei fenomeni geodinamici” è stata, inoltre, acquisita nel gennaio 2011 una batimetria di precisione nell’area del campo di Guendalina per un’estensione totale di circa 52 km<sup>2</sup> (Figura 11 e Figura 12). Il risultato di tale rilievo mostra un fondale con una profondità minima di circa 36.4 m nella parte nord-occidentale (blocco G01) che raggiunge i 42.6 m nella zona sud-orientale (blocco G04) con un picco di 43.4 m in aree con depressioni. L’area del rilievo si può, quindi, idealmente dividere in due zone, separate grosso modo dalla batimetria dei 41 metri: una zona ovest dal fondale piuttosto regolare con basse pendenze e una zona est più profonda e articolata. Nell’area rilevata sono presenti strutture che sembrano indicare depositi trasgressivi e di paleo-delta. Infatti, la morfologia dell’area riflette, come tutti i fondali del Mar Adriatico, la dinamica dei cicli trasgressivo - regressivi verificatisi durante l’ultima glaciazione wurmiana. L’esecuzione della batimetria *multibeam* è stata fatta al fine di ottenere un “termine di confronto” prima dell’avvio della produzione del campo, rilevando il fondale di un’area sufficientemente ampia da includere l’estensione del possibile cono di subsidenza, così come è stato previsto dal modello geomeccanico. In futuro, sulla base all’evoluzione dei valori di subsidenza registrati in continuo dal CGPS in piattaforma, si potrà, eventualmente, pianificare ed eseguire un nuovo rilievo batimetrico sia per il monitoraggio di eventuali abbassamenti del fondo mare, sia per una verifica e/o taratura delle previsioni modellistiche.

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:

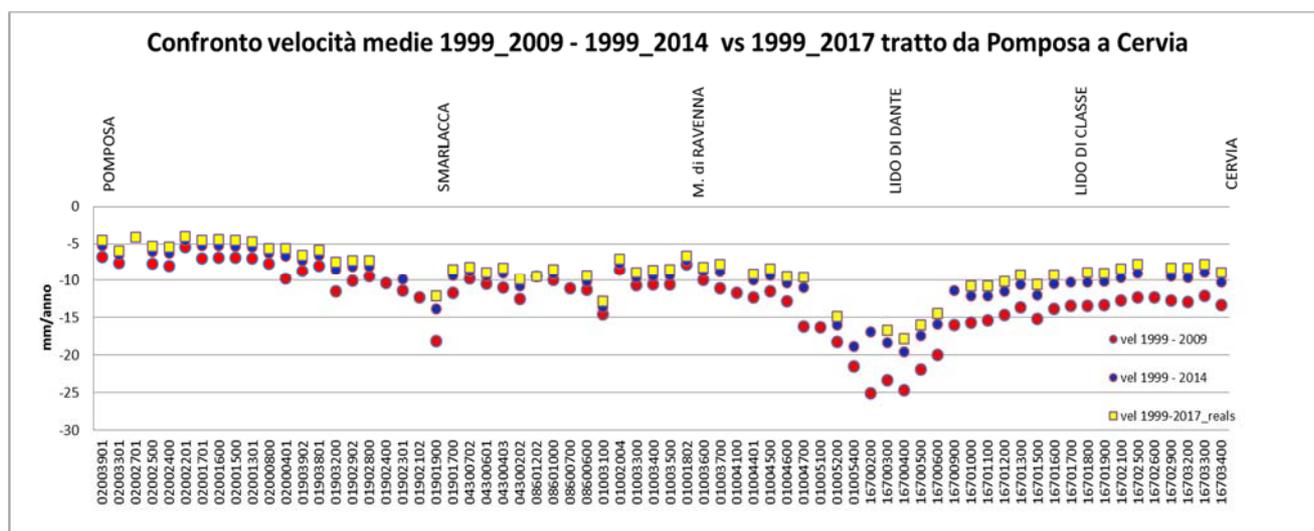
- dorsale Adriatica, da Treviso fino a Pesaro, compreso lo sviluppo degli sbracci sul delta del Po, per un totale di circa 1200 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 210 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.

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

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione.

Per ovviare a tale situazione determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. 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 CGPS permanenti della rete Eni. A questo proposito, però, è necessario anche segnalare che i valori delle quote dei capisaldi ottenuti con questo procedimento possono differire da quelli che si ottengono con la compensazione classica, che è invece vincolata a un solo caposaldo di riferimento. In effetti, ciò è stato osservato nel caso dei risultati del rilievo 2017, in cui le misure delle quote di alcuni capisaldi sono risultate maggiori dei corrispondenti valori rilevati con la livellazione del 2014. Valori questi ultimi che erano stati ottenuti con la compensazione classica vincolata al solo caposaldo di Treviso.

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

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

Al fine d'ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza 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 suolo<sup>1</sup> ( $V_a$ ) - 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 1999-2014 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.

L'analisi aggiornata con i dati del 2017 conferma, come detto in precedenza, il rallentamento della velocità di subsidenza, che è diffuso per tutto il tratto analizzato. Si collocano, infatti, nella classe 2 il 12% dei punti analizzati, il 69% dei punti ricade 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 dei dati di campagna basata sulle velocità delle stazioni CGPS, potranno eventualmente meglio definire i trend di movimento del tratto analizzato, al netto di eventuali movimenti anomali localizzati sui singoli capisaldi, movimenti che saranno oggetto di verifica durante le prossime campagne di misura.

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (ottobre 2018) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 13).

---

<sup>1</sup> 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.

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

Le serie storiche di misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2015 - 2016, sono, però, ancora troppo brevi per consentire valutazioni specifiche.

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche *SSU* (*Satellite Survey Unit*) equipaggiate ciascuna con un CGPS, un caposaldo di livellazione geometrica e 2 bersagli radar solidalmente connessi tra loro tramite una trave di cemento armato. Le 3 stazioni *SSU* sono state realizzate nelle Centrali Eni di Rubicone, di Fano e di Falconara nel dicembre 2007; 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 se-

rie 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 Guendalina, 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 14), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato nella seguente Tabella 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
Guendalina	14.33	21.49	-5.38		16.03	21.55	-5.57		-1.7	-0.06	0.18

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

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

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

Per il campo di Guendalina, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale<sup>2</sup> pari a -6.3 mm/a (Figura 14 - Figura 15) in linea con il valore del 2017 (-5.5 mm/a). Le elaborazioni delle nuove serie storiche sono state influenzate sia dal cambio del sistema di riferimento (da ITRF2008lgb08 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

<sup>2</sup>La "subsidenza totale CGPS" rappresenta in questo caso l'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma su cui è installato il CGPS. A determinare tale "subsidenza totale" concorrono vari fenomeni: la compattazione di strati profondi per estrazione di gas (subsidenza antropica), movimenti tettonici e costipazione naturale dei sedimenti (subsidenza naturale), compattazione dei sedimenti più superficiali a fondo mare per effetto del peso della piattaforma. Quest'ultimo fenomeno è evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa.

velocità medie pregresse, dovute anche al ricalcolo delle serie storiche delle stazioni di riferimento. In particolare, le verifiche effettuate hanno mostrato che tali condizioni possono determinare un aumento della velocità di subsidenza dell'ordine di 0.5 mm/anno, anche sulle serie storiche delle stazioni di riferimento.

I valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico 2018 sono stati, quindi, confrontati con quelli acquisiti dal CGPS (aggiornati al 31/12/2018), senza che questi ultimi siano stati depurati della componente di subsidenza naturale.

Come si vede dalla Figura 16, le misure CGPS si collocano sullo scenario di riferimento GPS DN\_J\_MINP confermando l'attendibilità dell'attuale modello di subsidenza.

Al fine di monitorare la compattazione profonda e il comportamento meccanico della roccia serbatoio, sono stati installati nel giugno 2011 alcuni *marker* di controllo nel pozzo Guendalina 2dir, registrando in tale data anche il rilievo base. Nel luglio del 2012 si è eseguito un primo *survey* di monitoraggio su un tratto di formazione compreso tra 3096.75 m e 3175.5 m ottenendo per il periodo 2011-2012 una compattazione totale media (Figura 17) di circa 13 mm in sostanziale accordo con le previsioni modellistiche.

I *survey* annuali del 2013 e 2014 non sono stati eseguiti a causa di problemi meccanici che hanno impedito la discesa in pozzo della strumentazione di misura (insabbiamento del fondo pozzo e rottura della string corta); i vari tentativi di ripristino dell'accessibilità del pozzo stesso non hanno, purtroppo, dato esito positivo.

Nel corso di un intervento di *work-over* eseguito nel 2015 sono stati reinstallati nuovi *marker* di controllo nel pozzo Guendalina 2dirA, perforato in *side-track* da Guendalina 2dir che è poi stato chiuso minerariamente. Si segnala che per ovviare alla mancata infissione di alcuni di tali *markers* in formazione, si sono anche inserite apposite fascette radioattive (*pipe tag*) sui collari del *casing*. Nel nuovo pozzo si è ripreso a monitorare la compattazione *in-situ* della roccia serbatoio, registrando il rilievo base il 27 ottobre 2015. Nel dicembre 2016, 2017 e novembre 2018 si sono eseguiti poi i *survey* annuali di controllo nel tratto compreso tra 3050 m e 3200 m. Nell'ambito della sensibilità strumentale della sonda FSMT usata e limitatamente alla breve serie storica di misure fin qui acquisita, si è stimata da tali registrazioni una compattazione complessiva di circa 15 mm (periodo 2015-2016), 17 mm (periodo 2016-2017) e 13 mm (periodo 2017-2018) con riferimento al *marker* posizionato a quota 3111.13 m e fino a quota 3151.61 m. Nella valutazione della compattazione non sono stati conside-

rati gli intervalli affetti da ridotta qualità della misura. Tali stime sono compatibili con il modesto valore di velocità di subsidenza misurata dal CGPS in piattaforma (-6.3 mm/a). D'altra parte si segnala che, in generale, questi rilievi sono caratterizzati da un'elevata deviazione standard (Figura 18) e pertanto si ritiene prudentiale non considerarli sufficientemente attendibili per un confronto con i risultati dei modelli geomeccanici. Infatti, in questo caso, l'errore nella misura è dello stesso ordine di grandezza del fenomeno di compattazione misurato.

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 Guendalina 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 19 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 20 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

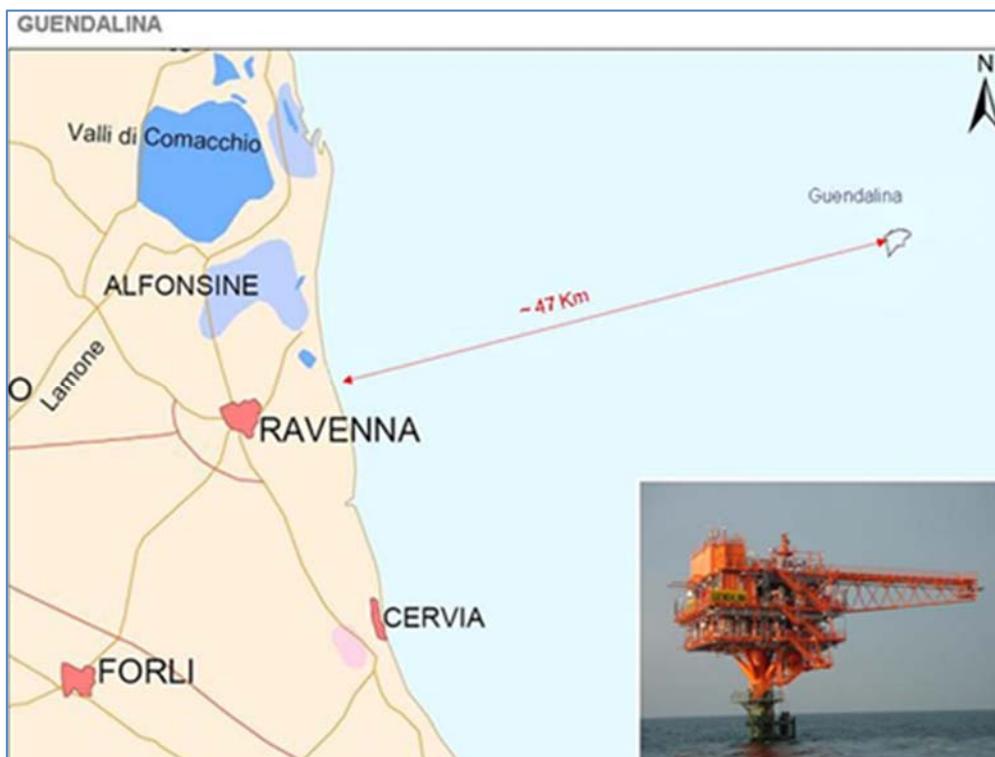


Figura 1 - Ubicazione del campo di Guendalina

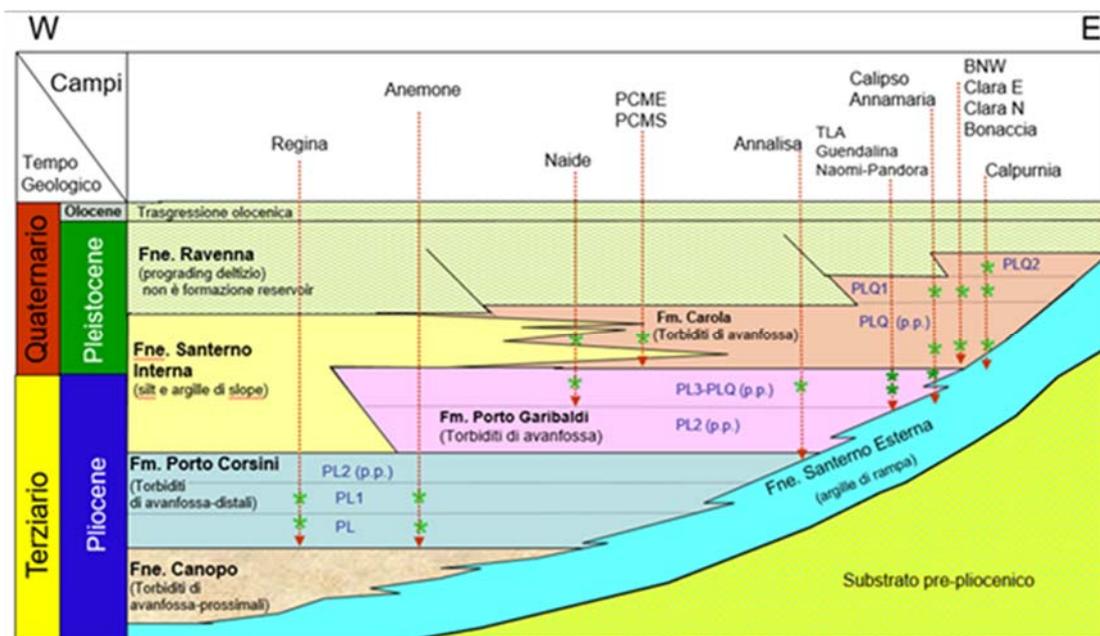


Figura 2 - Bacino Adriatico settentrionale: esempio di schema dei rapporti stratigrafici e dei principali reservoir (\*) sviluppati dai campi

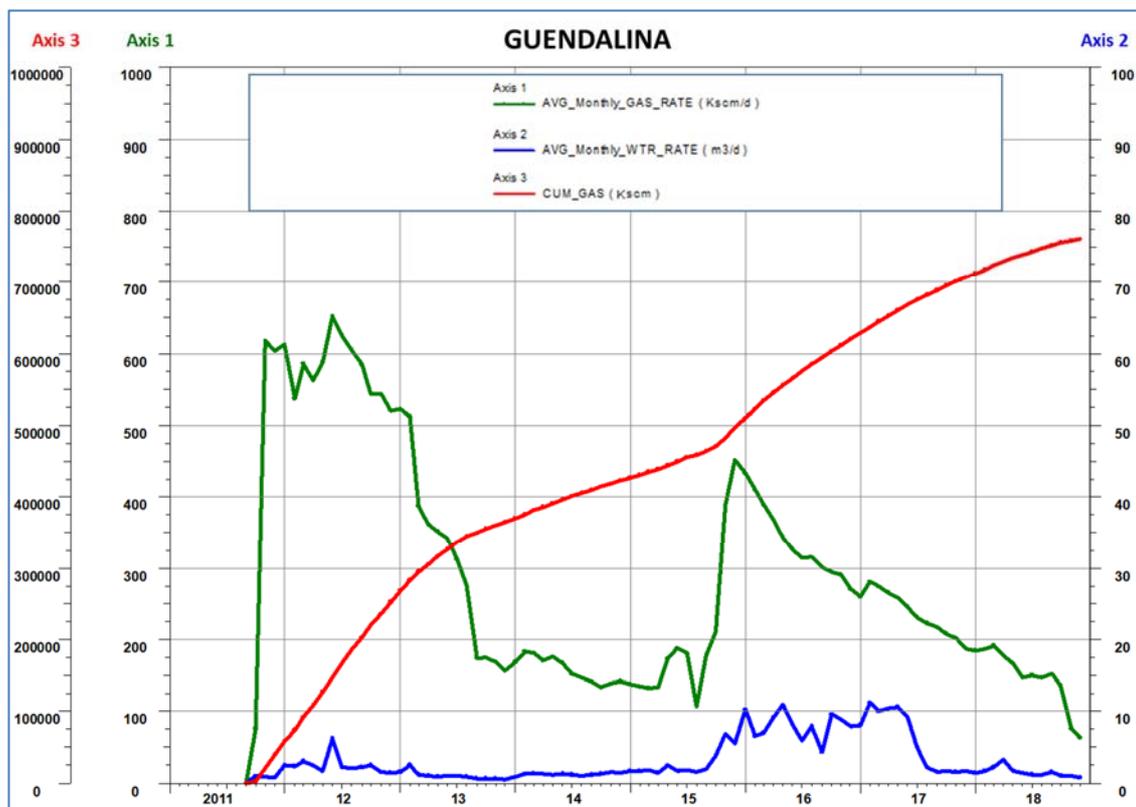


Figura 3 - Campo di Guendalina: produzione storica

CAMPO DI GUENDALINA					
ANNO	Produzione annuale (MSm <sup>3</sup> )		Produzione cumulativa (MSm <sup>3</sup> )		Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE
	Reale	Modello 3D ECLIPSE	Reale	Modello 3D ECLIPSE	
2011	40	40	40	40	4%
2012	212	212	252	252	28%
2013	113	113	365	365	41%
2014	58	58	423	423	47%
2015	74	74	497	497	55%
2016	124	124	620	621	69%
2017	87	87	707	707	78%
2018	54	61	761	768	84%
2019		52		820	
2020		41		861	
2021		25		886	
2022		15		902	
2023					
2024					
2025					

Figura 4 - Campo di Guendalina: produzioni reali e da modello Eclipse 2018

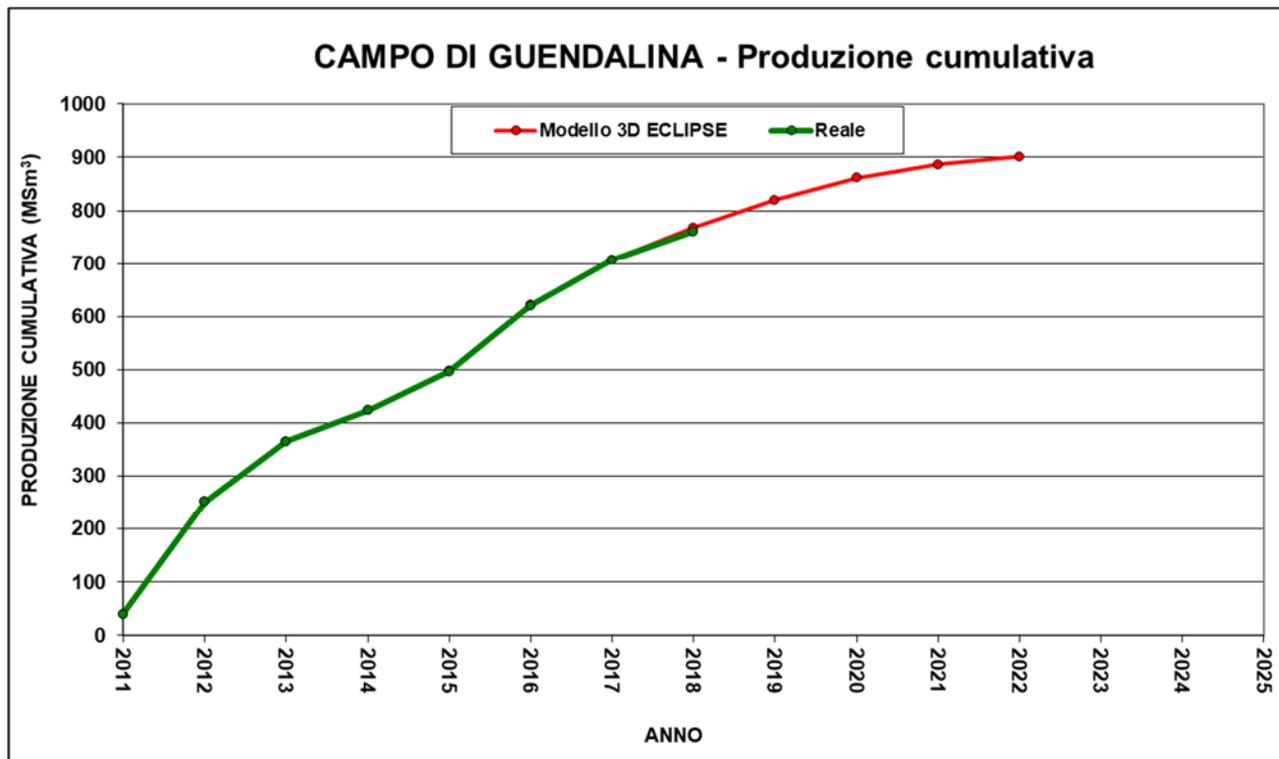


Figura 5 - Campo di Guendalina: produzione reale e da modello Eclipse 2018

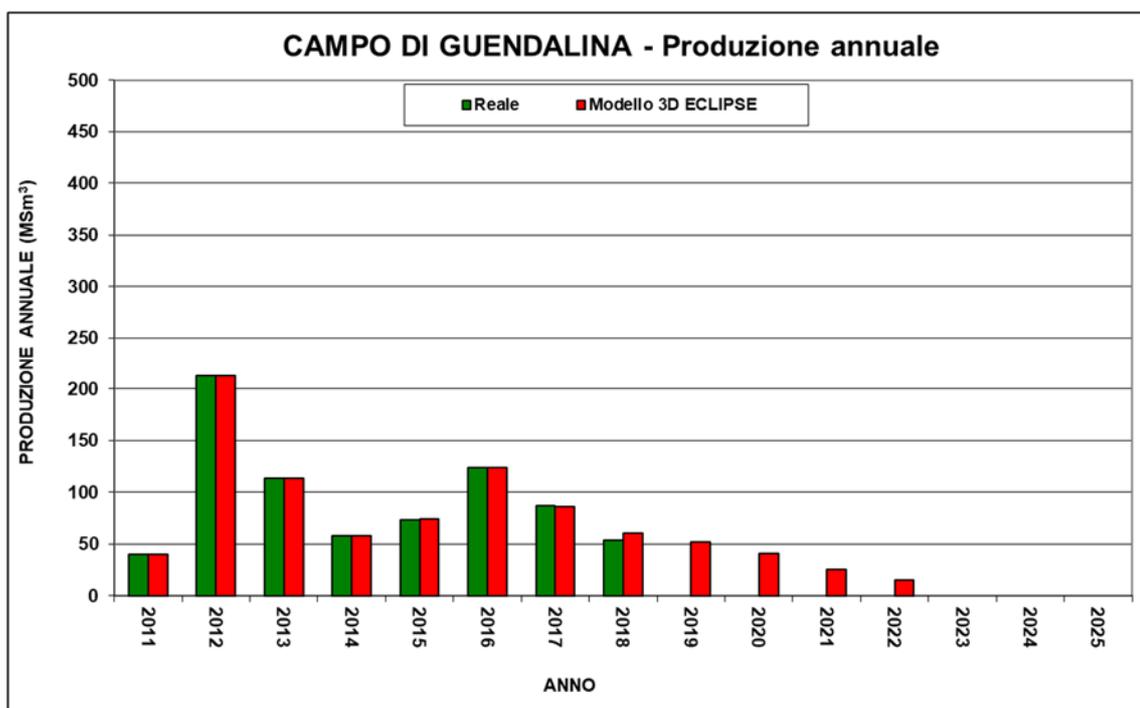


Figura 6 - Campo di Guendalina: produzione (annuale) reale e da modello Eclipse 2018



CAMPO DI GUENDALINA						
Data	Livello PL3-J3			Livello PL3-I1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
15/05/1998	339	1 Dir A		331	1 Dir A	
30/08/2013	190		3 L	269		3 C
20/10/2013				248		3 C
19/10/2014				278		3 C
15/09/2015				259	2 Dir A	
17/12/2016	121		3 L	237		3 C
30/12/2017	101		3 L	215		3 C
24/06/2018	94		3 L	228		3 C

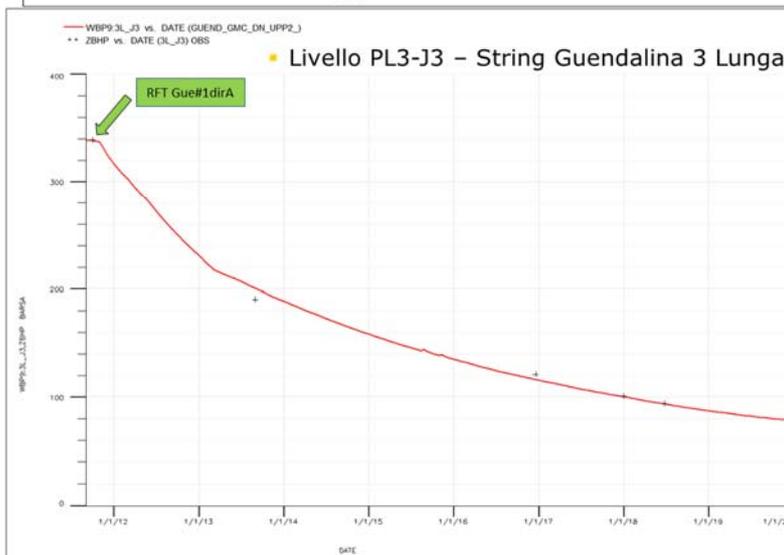


Figura 7 - Campo di Guendalina: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2018 (liv. PL3-I1 e PL3-J3)

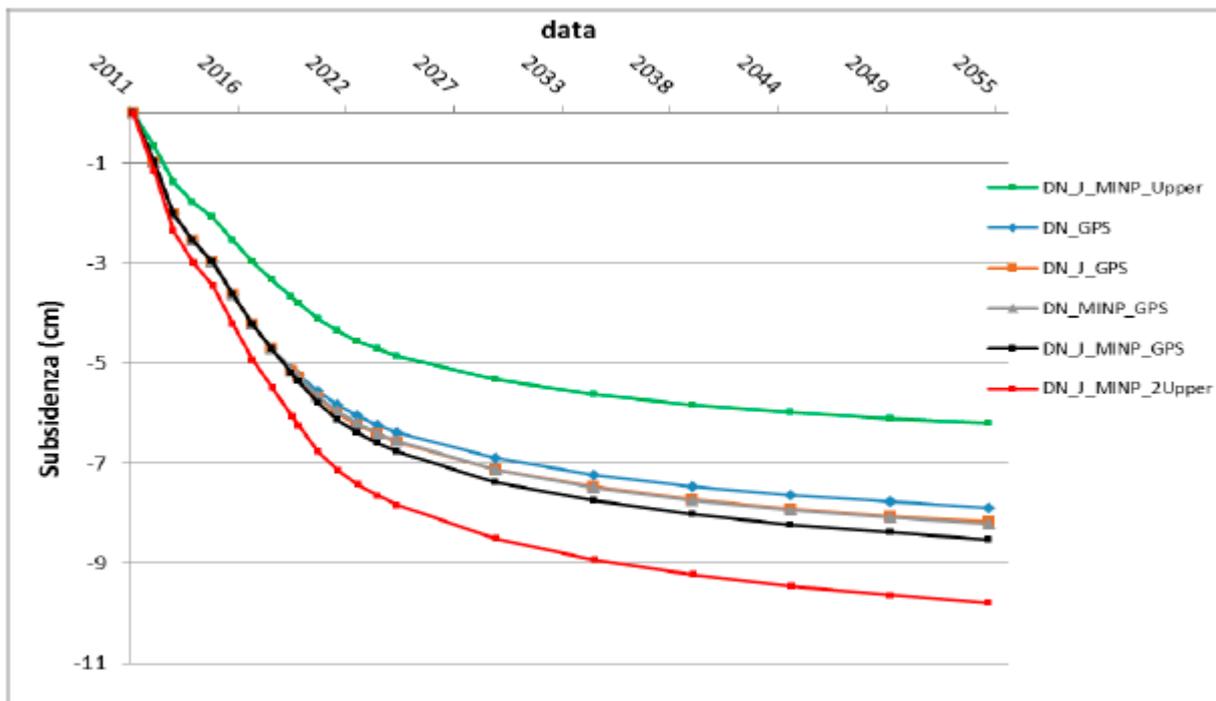


Figura 8 - Campo di Guendalina: evoluzione della subsidenza nel punto di massimo

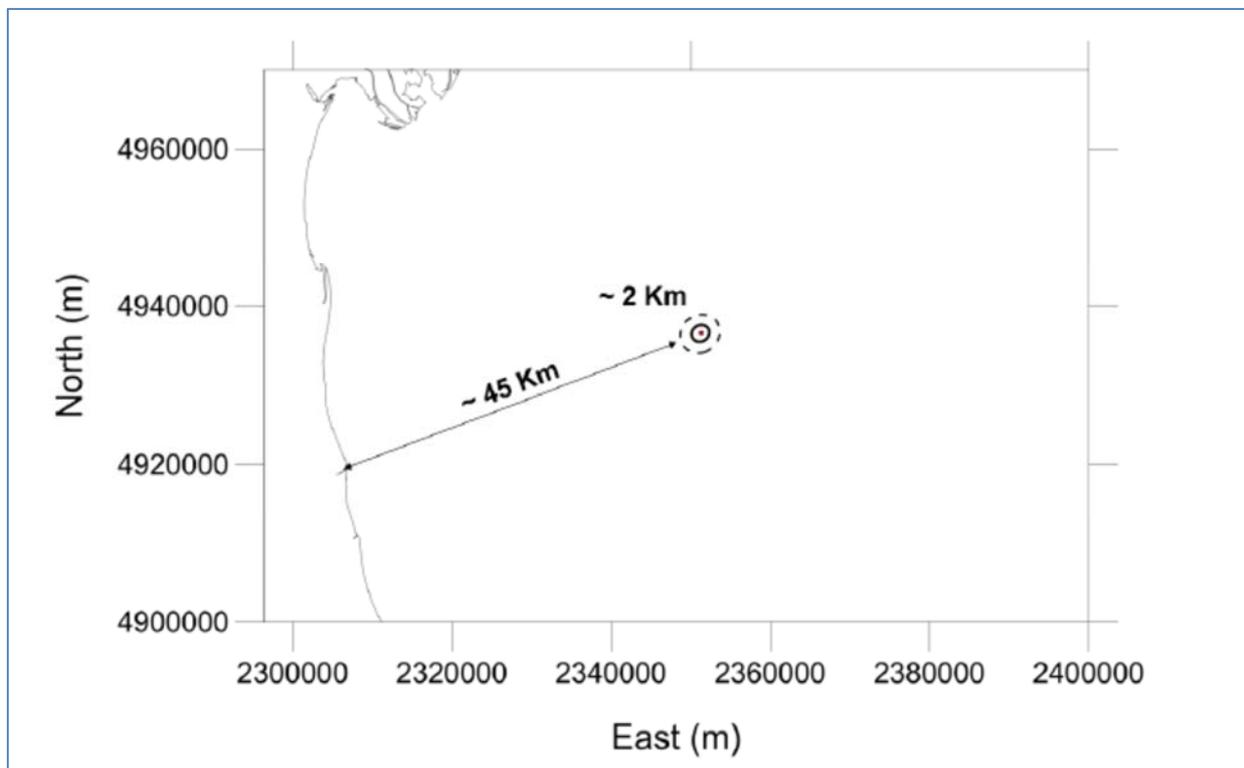


Figura 9 - Campo di Guendalina: Curve di iso-subsidenza per lo scenario GPS, caso DN\_J\_MINP, a fine produzione (2022). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

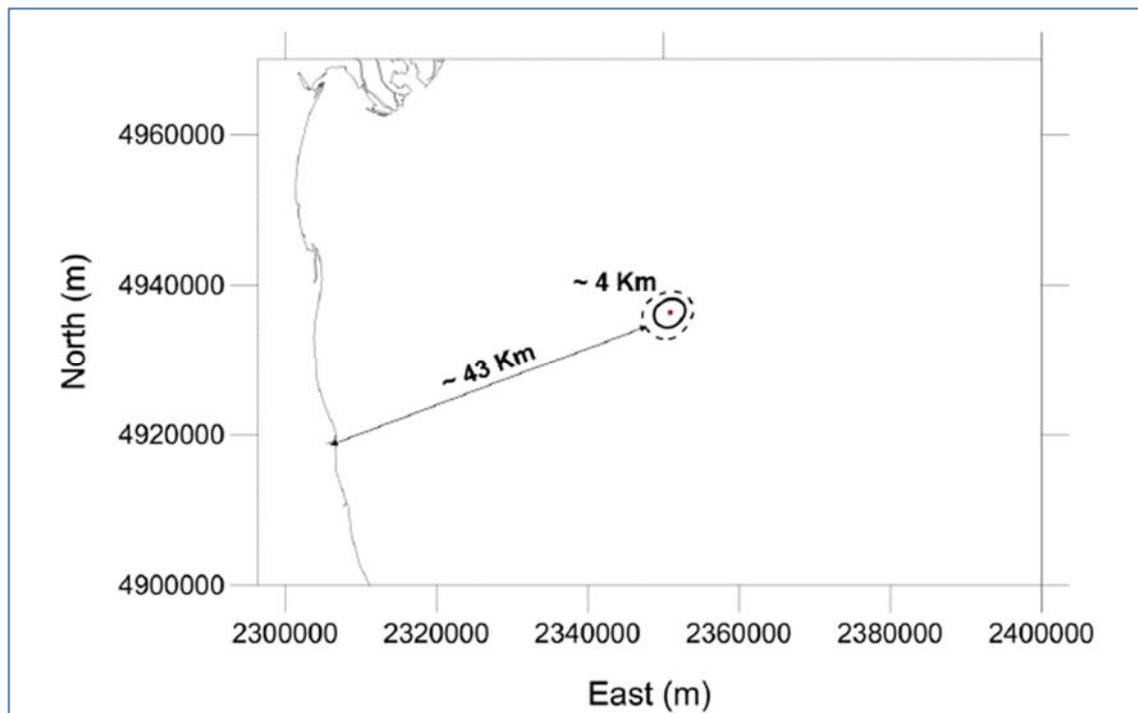


Figura 10 - Campo di Guendalina: curve d'iso-subsidenza per lo scenario 2 Upper (caso DN\_J\_MINP) a fine simulazione (2055). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

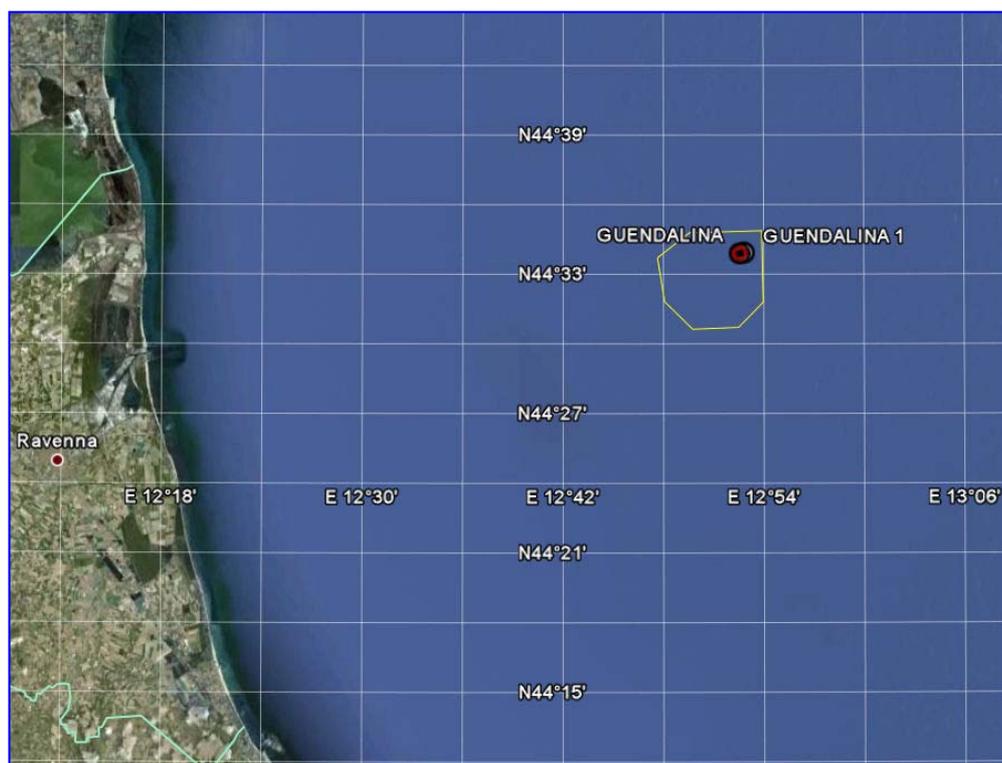


Figura 11 - Batimetria di Guendalina: perimetro dell'area rilevata mappa delle isobate e superficie 3D

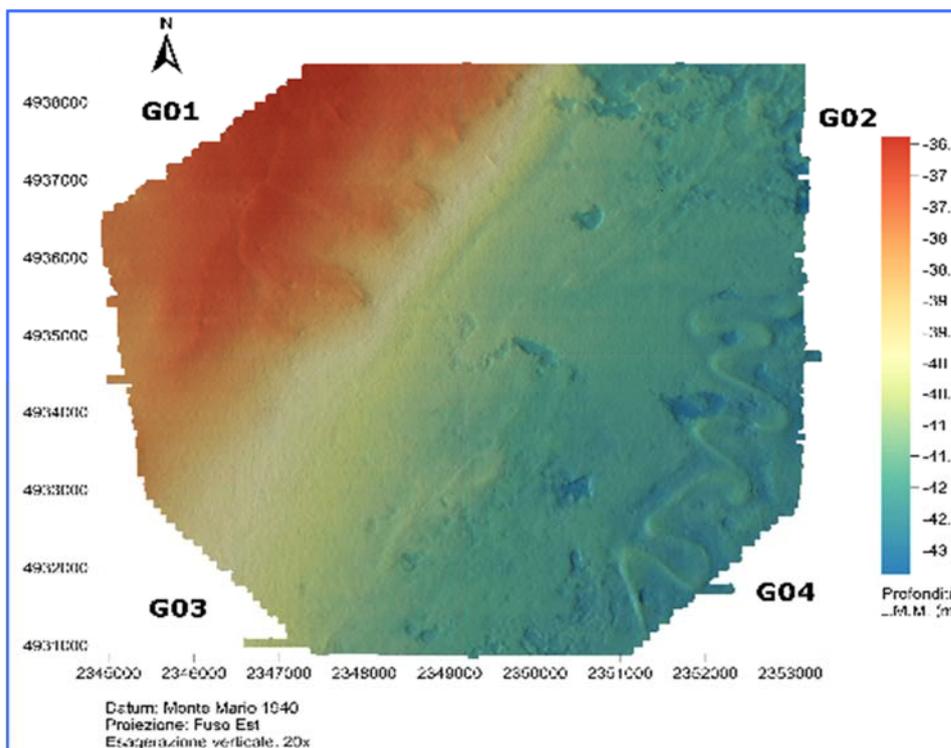
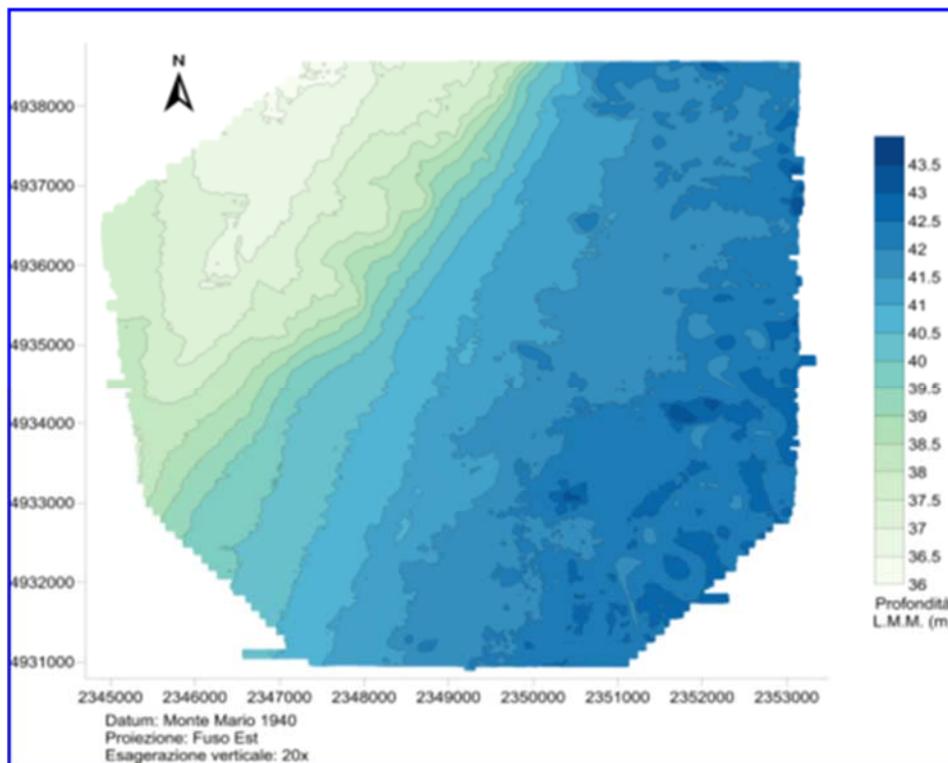


Figura 12 - Batimetria di Guendalina: mappa delle isobate e superficie 3D

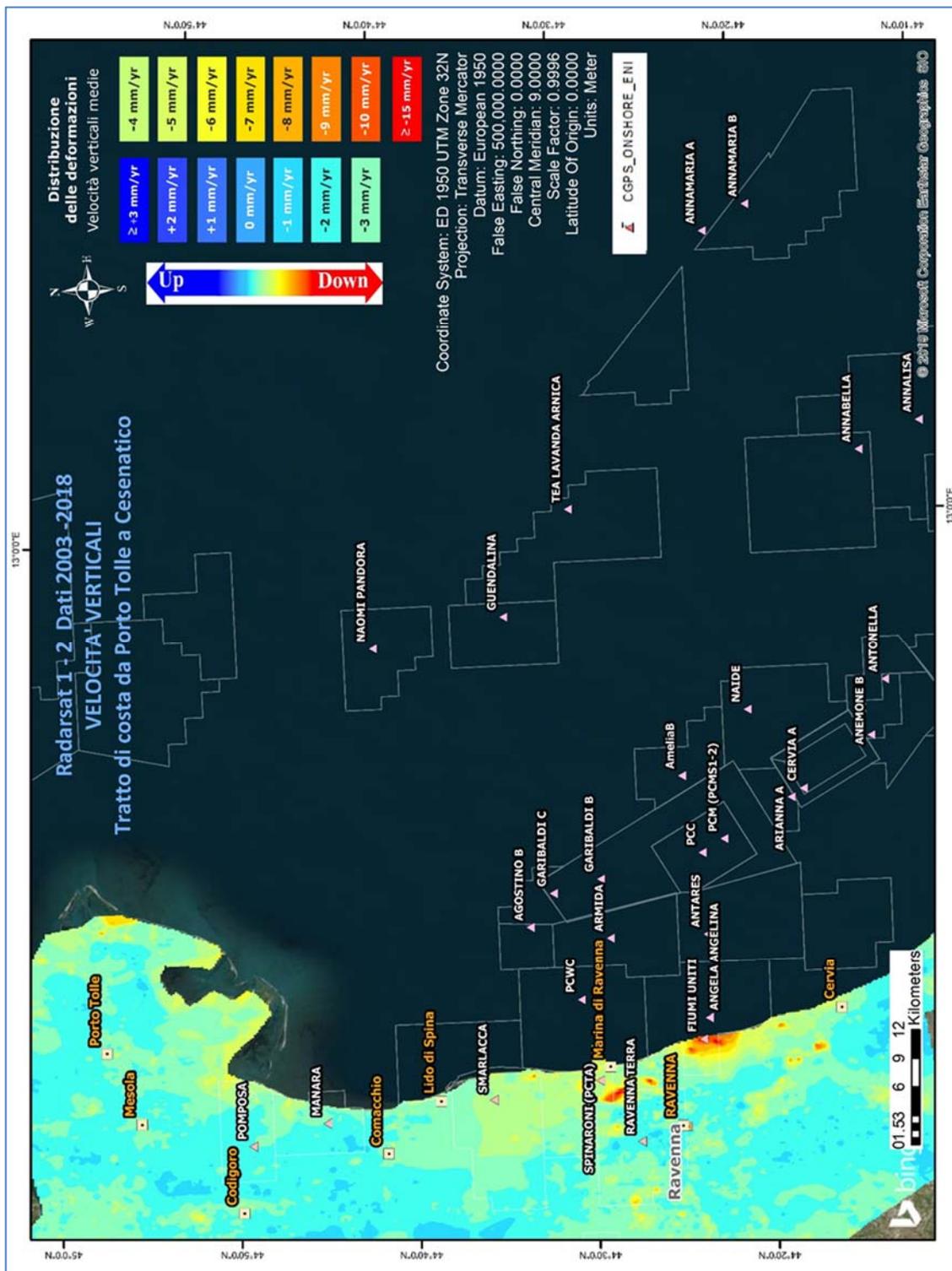


Figura 13 - Campo di Guendalina: analisi dei dati SAR dal 2003 al 2018.

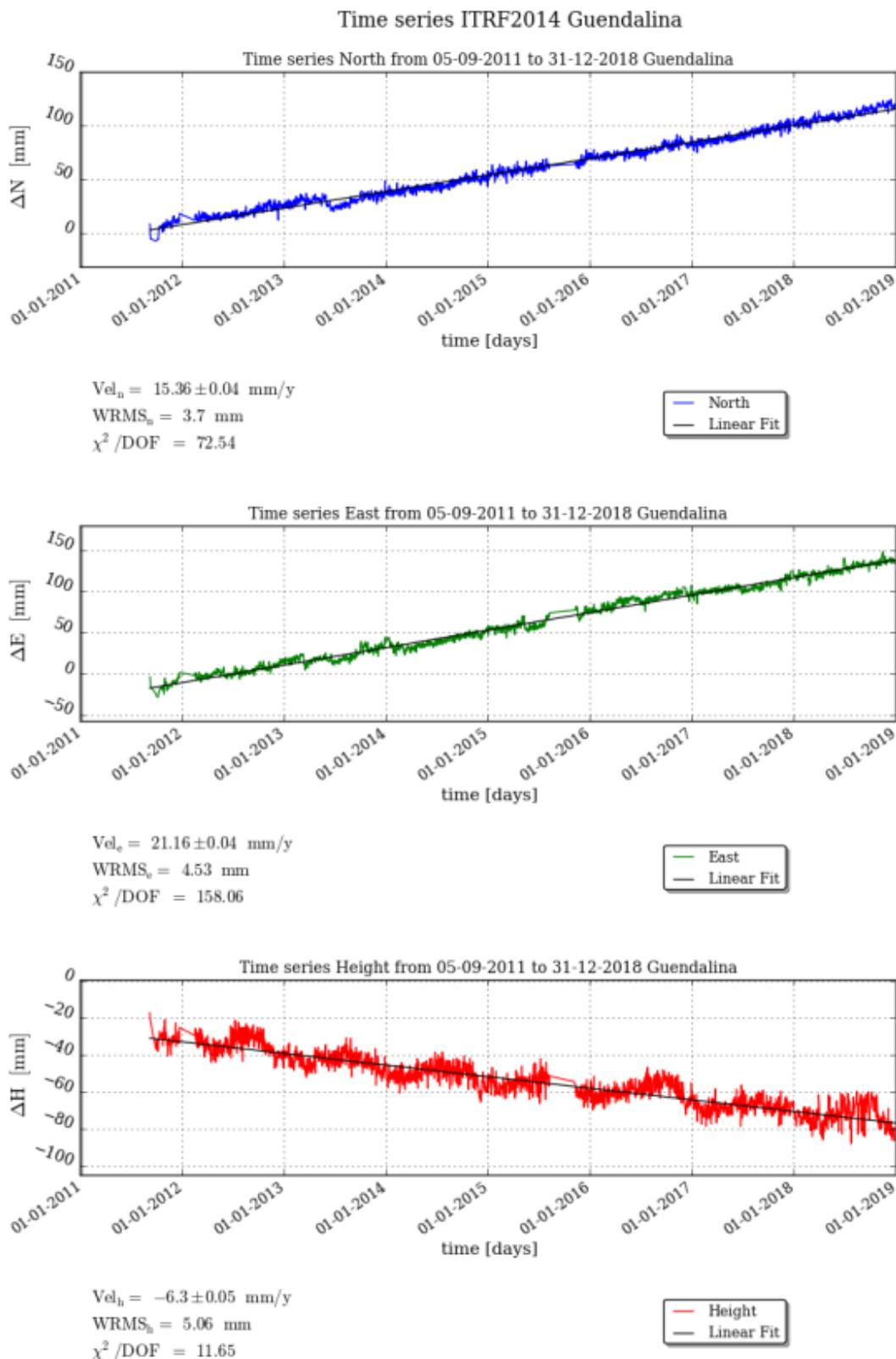


Figura 14 - Campo di Guendalina: serie storiche di misure CGPS

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

Figura 15 - Velocità medie di “subsidenza totale” calcolate per tutta la serie storica di misure

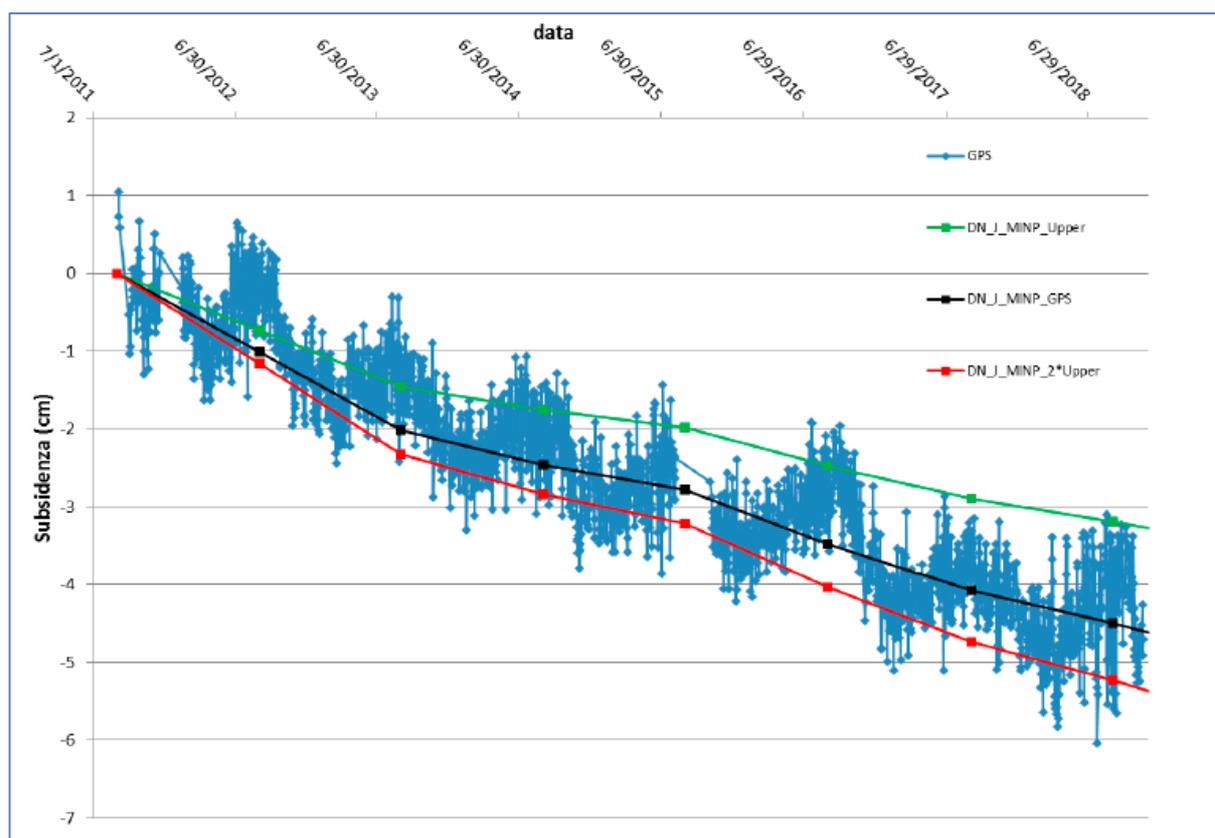


Figura 16 - Spostamento misurato (curva GPS celeste) e calcolato (3 scenari di compressibilità) in corrispondenza della stazione GPS di Guendalina.  
 In nero il caso di riferimento (calibrato sul GPS) DNJ\_MINP\_GPS.



Guendalina 2 Dir								
		2011 Survey			2012 Survey			Results
		Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcessed	Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcess	Difference 2011 - 2012 mm.
<b>3070m - 3200m</b>	3096.75	10.5104	0.0009	4	10.51678	0.00112	3	6.38
	3102.00	10.5364	0.0014	4	10.53691	0.00233	3	0.51
	3107.25	10.4824	0.0005	4	10.4778	0.0009	3	-4.60
	3112.50	10.5472	0.0011	4	10.54531	0.00057	3	-1.89
	3117.75	10.7529	0.0007	4	10.75488	0.0026	3	1.98
	3123.00	10.6776	0.0007	4	10.68061	0.00101	3	3.01
	3128.25	10.4892	0.0004	4	10.48965	0.0013	3	0.45
	3133.50	10.5159	0.0003	4	10.51411	0.00039	3	-1.79
	3138.75	10.4989	0.0006	4	10.50583	0.00092	3	6.93
	3144.00	NO DATA	NO DATA	4			3	
	3149.25	10.5099	0.0005	4	10.49323	0.0009	3	-16.67
	3159.75	10.4741	0.0011	4	10.47074	0.0006	3	-3.36
	3165.00	10.5022	0.0003	4	10.4989	0.0009	3	-3.30
	3170.25	10.7382	0.0014	4			3	
	3175.5	10.7106	0.0008	4			3	
	3180.75	NO DATA	NO DATA	4			3	
3186	NO DATA	NO DATA	4			3		

Figura 17 - Pozzo Guendalina 2dir: misure di compattazione in-situ (da FSMT) e deviazione standard

GUENDALINA 2 DIR A																	
Bullet NO.	Original Depth (m)	OTT-2015 Survey			DEC-2016 Survey			Results	DEC-2017 Survey			Results	NOV-2018 Survey			Results	
		Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcessed	Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcessed	Difference 2015 - 2016 (mm)	Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcessed	Difference 2016 - 2017 (mm)	Mean Spacing	Standard Deviation	Passes Prcessed	Difference 2017 - 2018 (mm)	
15	3060.17	38.81560	5.92514	4	38.87262	24.02648	4	-57.02	38.89429	1.97	3	21.67	38.89497	3.72366	3	0.68	
14	3099.06	5.21748	2.81366	4	5.23001	2.52929	2	-12.53	5.23493	1.53	3	4.92	5.24124	7.73003	3	6.31	
13	3104.33	6.78565	3.31920	4	6.79444	6.44623	3	-8.79	6.79575	1.32	3	1.31	6.80094	3.54291	3	5.19	
12	3111.13	3.67371	8.94249	4	3.66331	7.11417	2	10.4	3.67385	1.76	3	10.54	3.67212	6.67184	3	-1.73	
11	3114.82	5.26261	11.07752	4	5.25946	6.13099	3	3.15	5.2620	7.11	3	2.53	5.26717	2.23118	3	5.18	
10	3120.08	10.47937	9.62796	4	10.47754	8.56489	3	1.83	10.4903	3.34	3	12.75	10.49268	1.4417	3	2.39	
9	3130.59	10.49064	15.89615	4	10.49583	13.69815	3	-5.19	10.4931	3.16	3	-2.73	10.49213	6.17748	3	-0.97	
8	3141.08	10.50475	2.29887	4	10.52647	19.85244	2	-21.72	10.50103	1.74	3	-25.44	10.49482	2.41209	3	-6.21	
7	3151.61	10.47247	4.86123	4	10.47580	18.60585	3	-3.33	10.46095	6.33	3	-14.85	10.44934	2.59752	3	-11.61	
6	3162.09	10.51721	7.63065	4	10.49389	20.70322	2	23.32	10.52118	8.68	3	27.29	NO DATA	NO DATA	NO DATA		
5	3172.63	10.48537	4.23660	4	10.44706	0.00000	2	38.31	NO DATA	NO DATA	NO DATA		NO DATA	NO DATA	NO DATA		
4	3183.14	10.46809	6.36086	4	NO DATA	NO DATA	NO DATA						NO DATA	NO DATA	NO DATA		
3	3193.64	6.73798	2.26349	4	NO DATA	NO DATA	NO DATA									3	
2	3200.4	3.74791	3.95022	4	NO DATA	NO DATA	NO DATA									3	
1	3204.17	5.49076	3.44812	4	NO DATA	NO DATA	NO DATA									3	
0	3209.69	no data		4	NO DATA	NO DATA	NO DATA									3	

Figura 18 - Pozzo Guendalina 2dirA: misure di compattazione in-situ (da FSMT) e deviazione standard

campo GUENDALINA (J.V. Eni 80% - Rockhopper 20%)																					
DATI DI CAMPO		DEC. VIA n. 0009995 del 22 aprile 2009																			
UBICAZIONE		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (GUENDALINA)																			
PROFONDITA' FONDALE	offshore - 47 km E costa romagnola 42 m																				
LITOLOGIA	terreni pliocenici sabbiosi/argillosi																				
FORMAZIONE RESERVOIR	Porto Garibaldi																				
ZONA MINERARIA	PL 3 e PL																				
PROFONDITA' RESERVOIR	3000 - 3080 (TVSS)																				
TIPO DI PIATTAFORMA	fissa monobulone - BEAF																				
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	torbiditi sottili																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SIA</th> <th>ULTIMO AGGIORNAMENTO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>STUDIO DI GIACIMENTO</td> <td>MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "giu-luglio '07"</td> <td>Studio integrato di giac., Doc. N° IPET-4DC25805-0 (ott. 2018)</td> </tr> <tr> <td>RISERVE (MSm<sup>3</sup>)</td> <td>757</td> <td>902</td> </tr> <tr> <td>MOD. GEOMECCANICO</td> <td>ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ agosto 2007</td> <td>ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ novembre 2018</td> </tr> <tr> <td>MAX SUBS AL CENTRO (cm)</td> <td>1,5 (dopo 10 anni) - caso "Most Likely"</td> <td>6,4 (nel 2022) - scenario GPS-DN_J_MNP</td> </tr> <tr> <td>DISTANZA DALLA COSTA (km)</td> <td>#</td> <td>&gt; 40 Km @ 2055 (fine simulazione) per tutti gli scenari considerati</td> </tr> </tbody> </table>			SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO	STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "giu-luglio '07"	Studio integrato di giac., Doc. N° IPET-4DC25805-0 (ott. 2018)	RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	757	902	MOD. GEOMECCANICO	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ agosto 2007	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ novembre 2018	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	1,5 (dopo 10 anni) - caso "Most Likely"	6,4 (nel 2022) - scenario GPS-DN_J_MNP	DISTANZA DALLA COSTA (km)	#	> 40 Km @ 2055 (fine simulazione) per tutti gli scenari considerati
	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO																			
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "giu-luglio '07"	Studio integrato di giac., Doc. N° IPET-4DC25805-0 (ott. 2018)																			
RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	757	902																			
MOD. GEOMECCANICO	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ agosto 2007	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ novembre 2018																			
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	1,5 (dopo 10 anni) - caso "Most Likely"	6,4 (nel 2022) - scenario GPS-DN_J_MNP																			
DISTANZA DALLA COSTA (km)	#	> 40 Km @ 2055 (fine simulazione) per tutti gli scenari considerati																			
		STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI																			
CONCESSIONE	A.C35.AG																				
DATA SCADENZA CONCESSIONE	25/11/2022																				
N. POZZI		2	2																		
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )		757	902																		
START UP PRODUZIONE	ott-11																				
FINE PRODUZIONE PREVISTA		2021	2022																		
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> )			761																		
% RISERVE PRODOTTE			84%																		
		<p><b>LIVELLAZIONI</b> 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</p> <p><b>MARKERS</b> MARKERS SU GUENDALINA 2dirA: ULTIMO SURVEY @ novembre 2018. SURVEY ESEGUITI: ottobre 2015, dicembre 2016, dicembre 2017</p> <p><b>CGPS</b> OPERATIVO DA AGOSTO 2011</p> <p><b>SAR</b> 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</p>																			

Figura 19 - Campo di Guendalina: scheda di sintesi

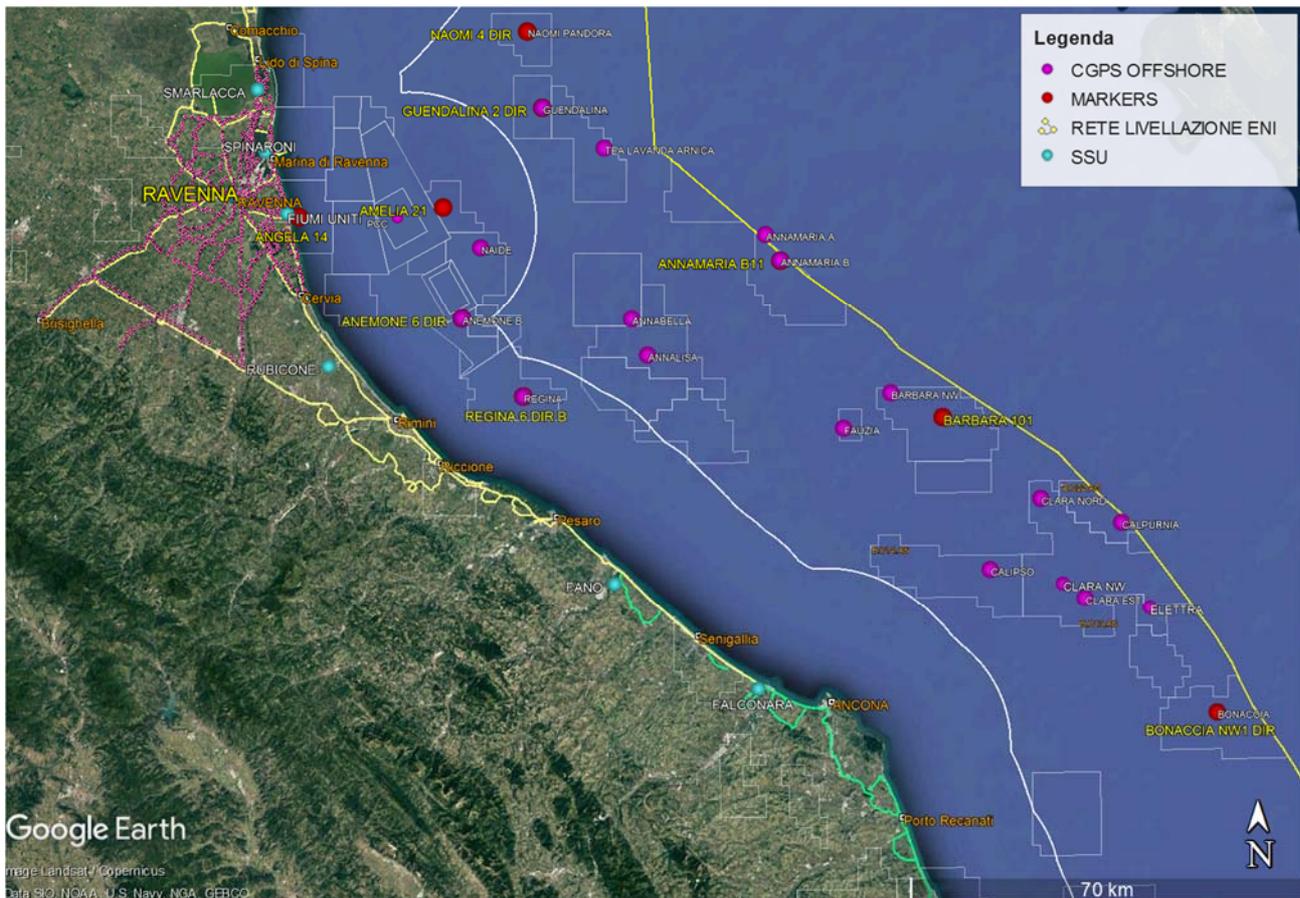


Figura 20 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

## 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
	<b>SMARLACCA</b>	<b>-6.33</b>	<b>0.01</b>	<b>-3.41</b>	<b>1.09</b>	<b>-2.92</b>	<b>1.10</b>
	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

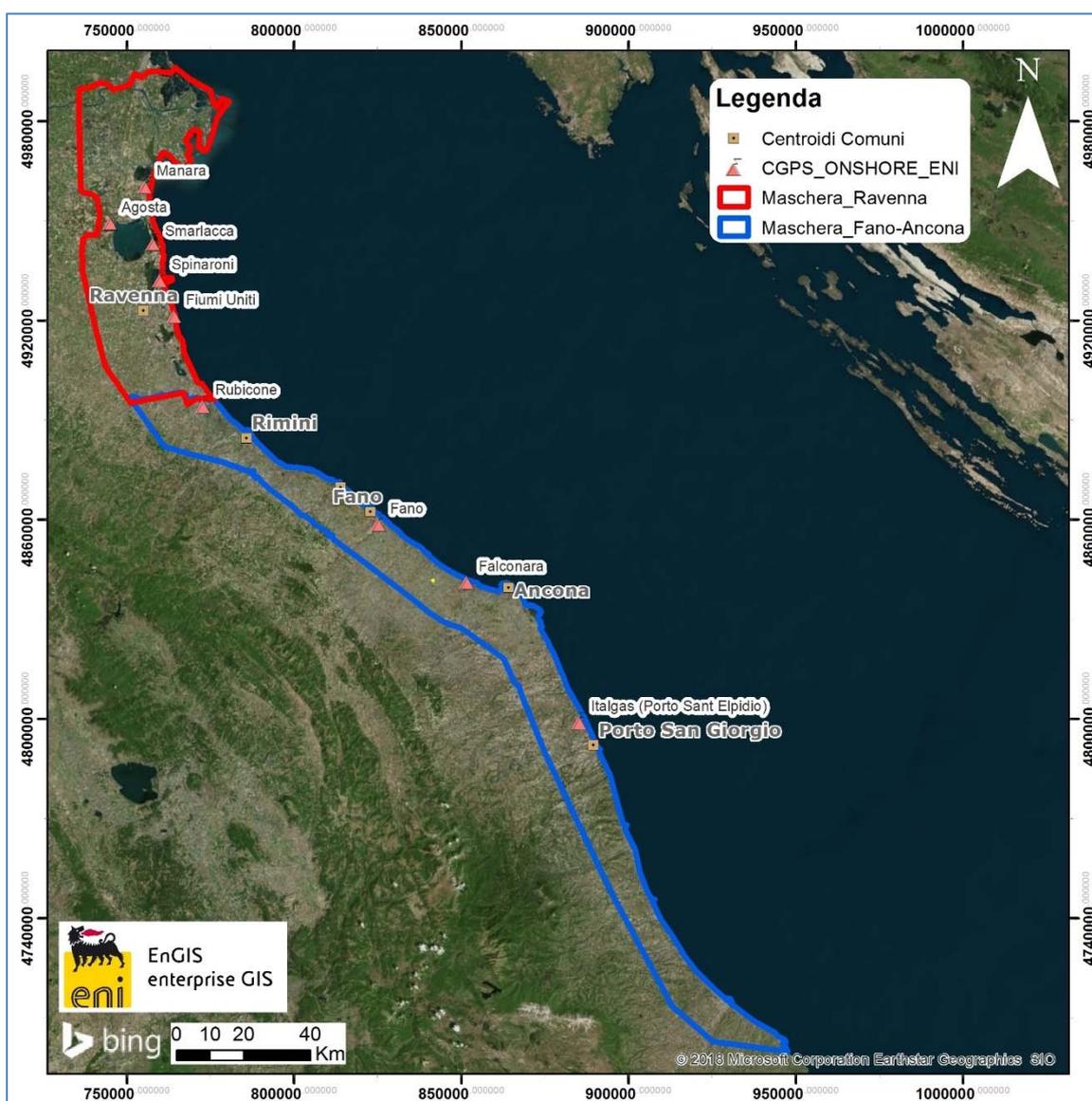


Fig. 1 – Mappa mosaicata dati InSAR

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

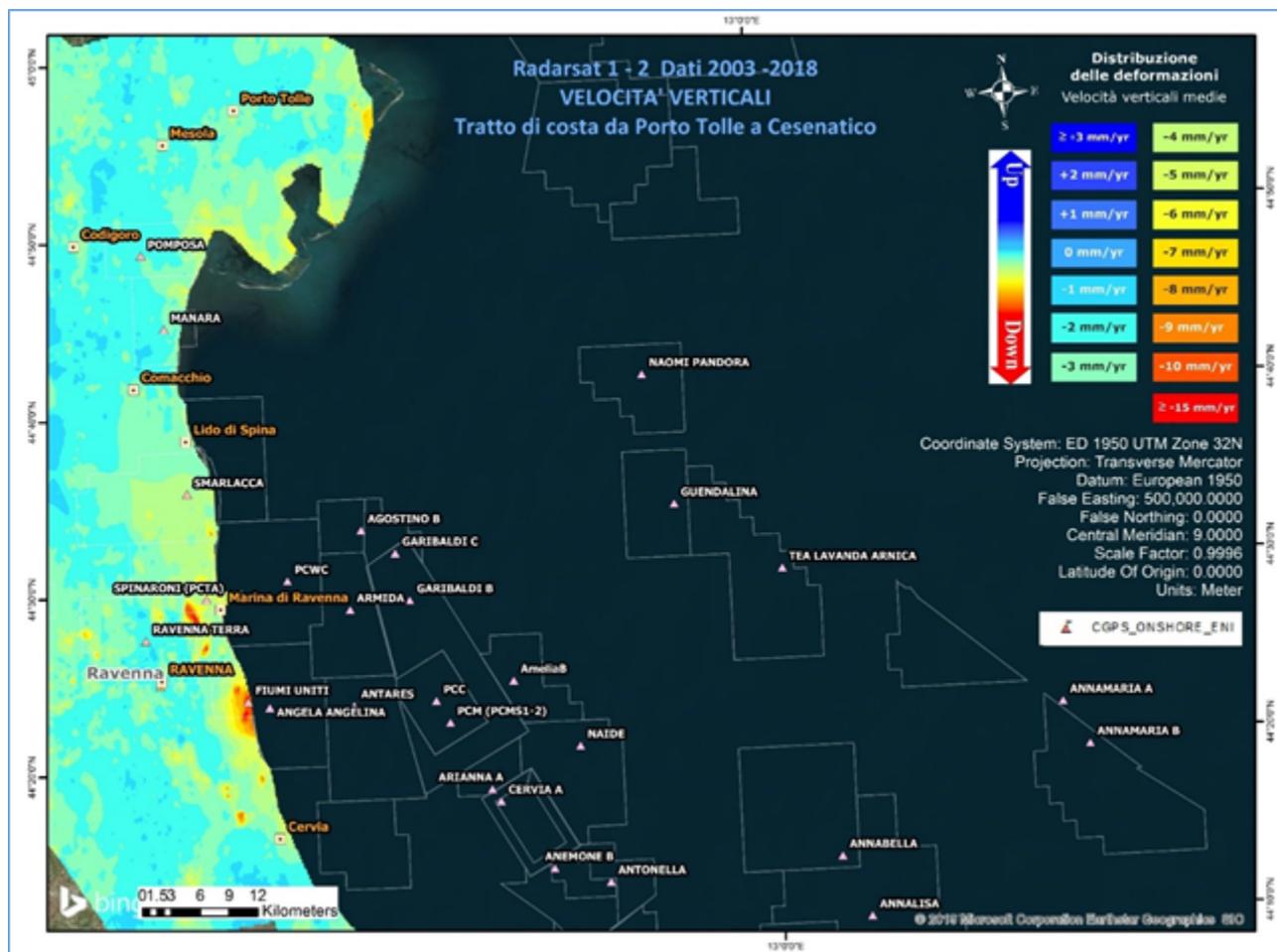
1. Area Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti
2. Area Fano-Ancona: Rubicone, Fano, Falconara, Italgas

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  $-3.41 \pm 1.09$  mm/anno. Considerando la velocità determinata con il CGPS di  $-6.33 \pm 0.01$  mm/anno, si rileva una differenza di  $-2.92 \pm 1.10$  mm/anno.

Per questo motivo ai valori di velocità media della componente verticale determinata con il monitoraggio SAR, è stato aggiunto il valore di  $-2.92 \pm 1.10$  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.

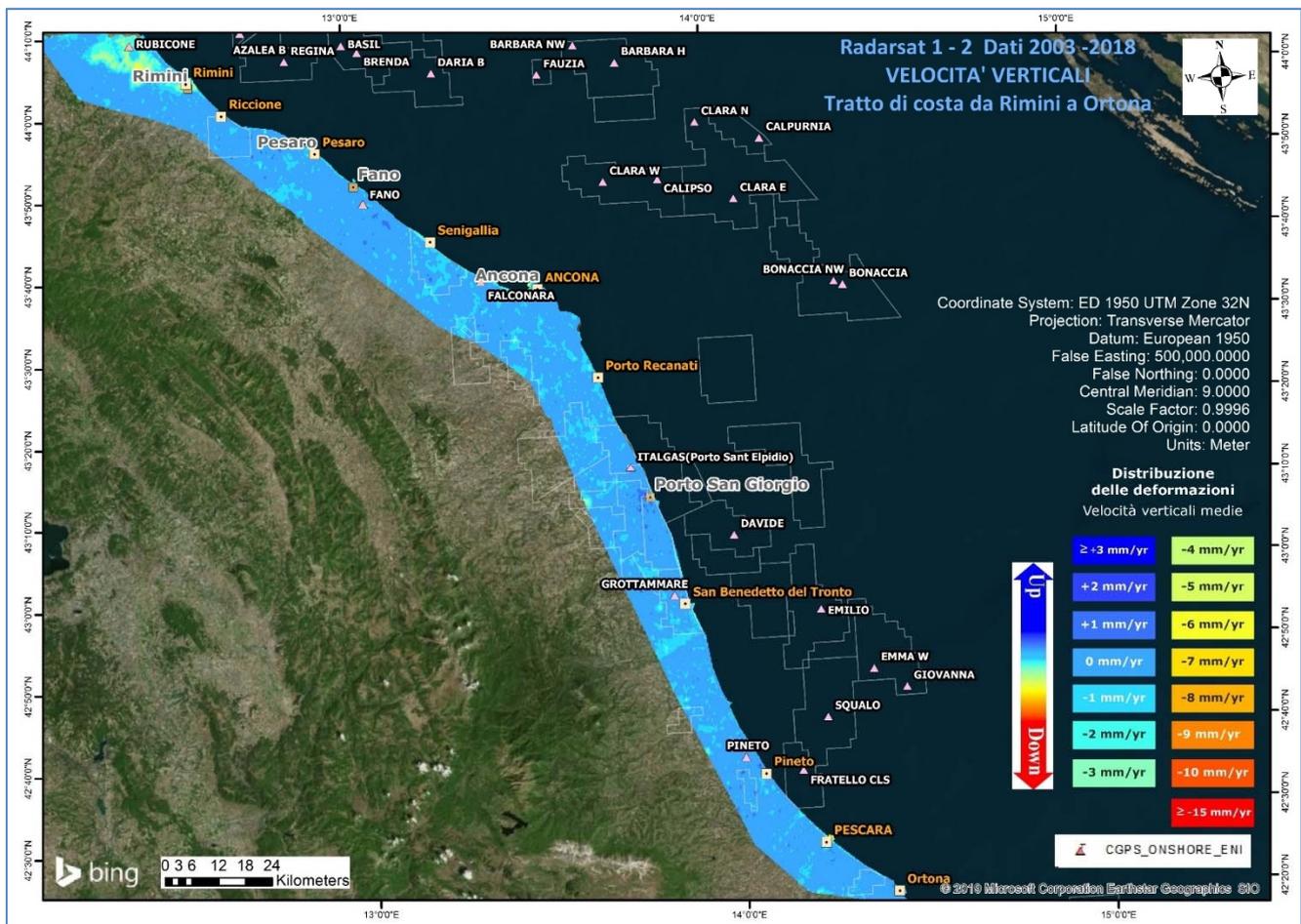


**Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.**

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 ( $-0.04 \pm 0.71$  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.

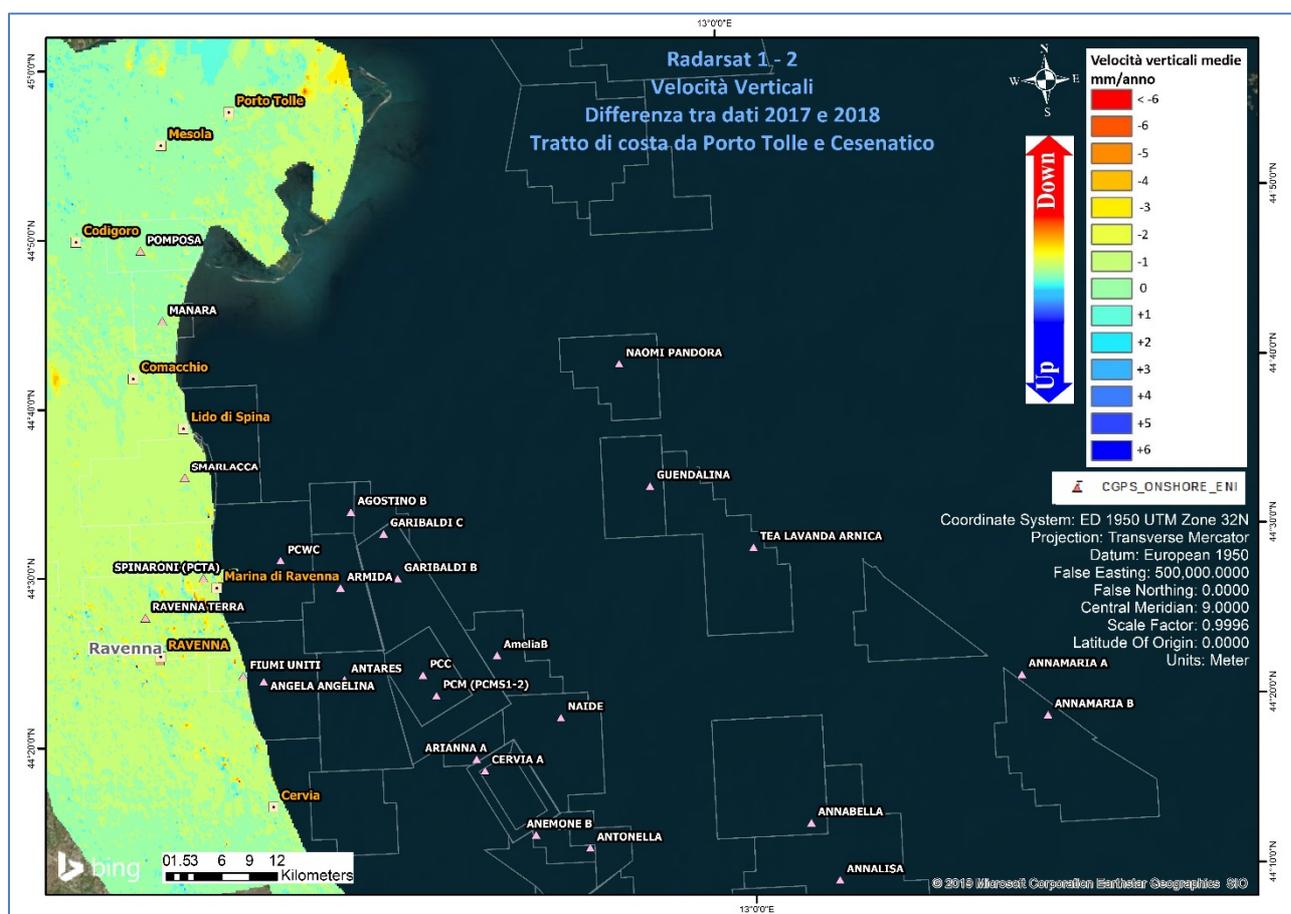
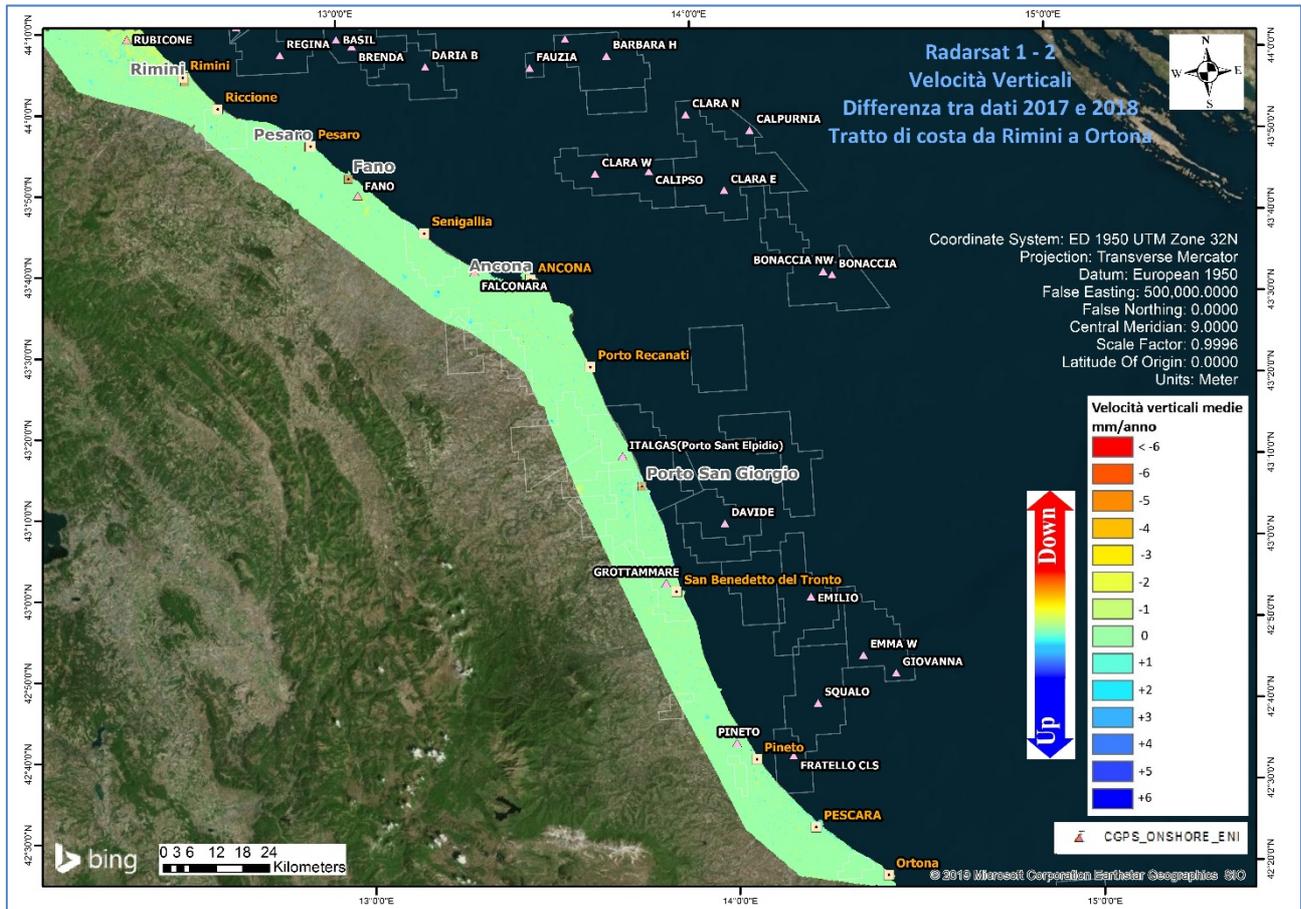


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.



**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, tralici, 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.



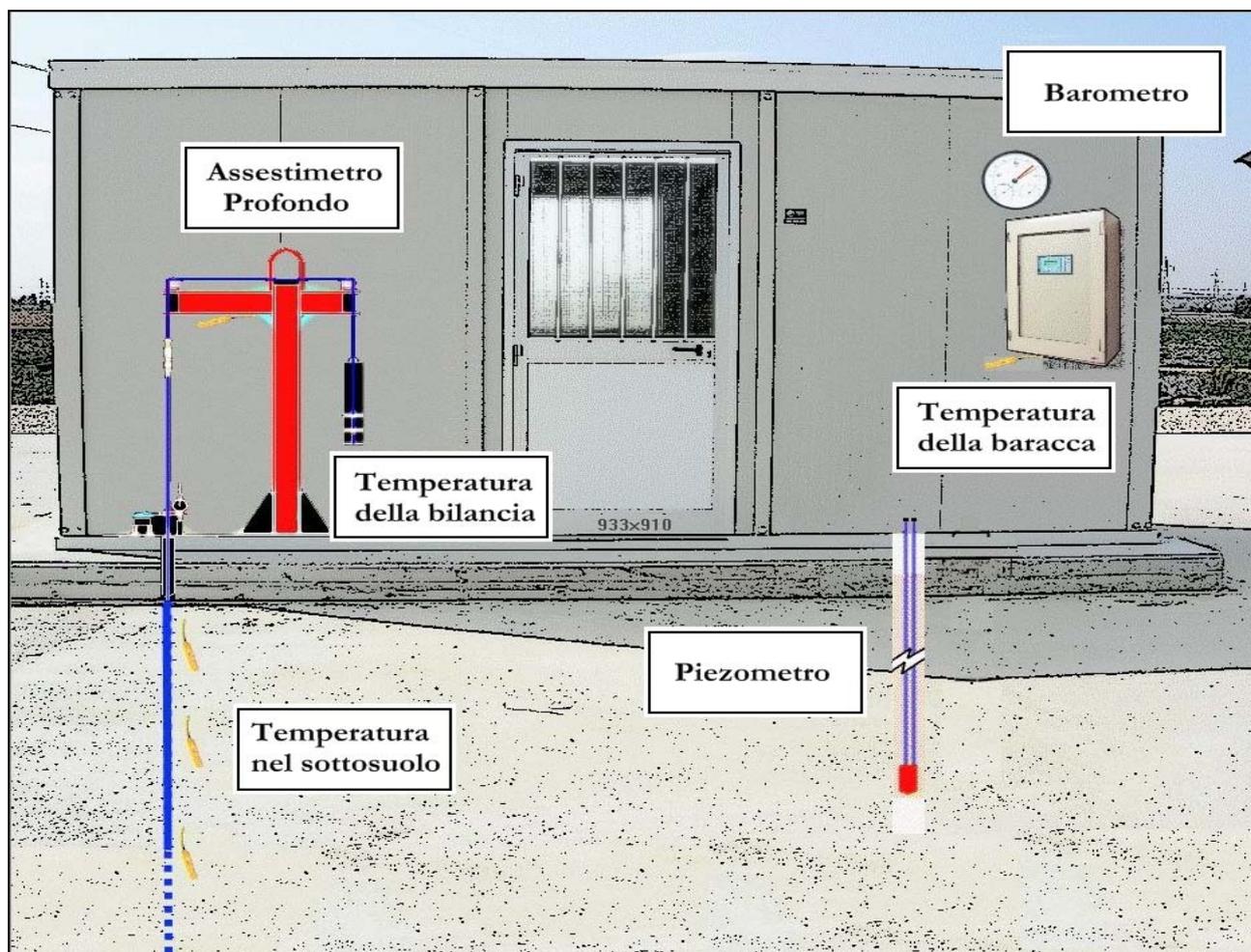


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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
<b>Smarlacca</b>		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Assestimetro superficiale	30 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
<b>Spinaroni</b>		Assestimetro profondo	336 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
<b>Fiumi Uniti</b>		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.

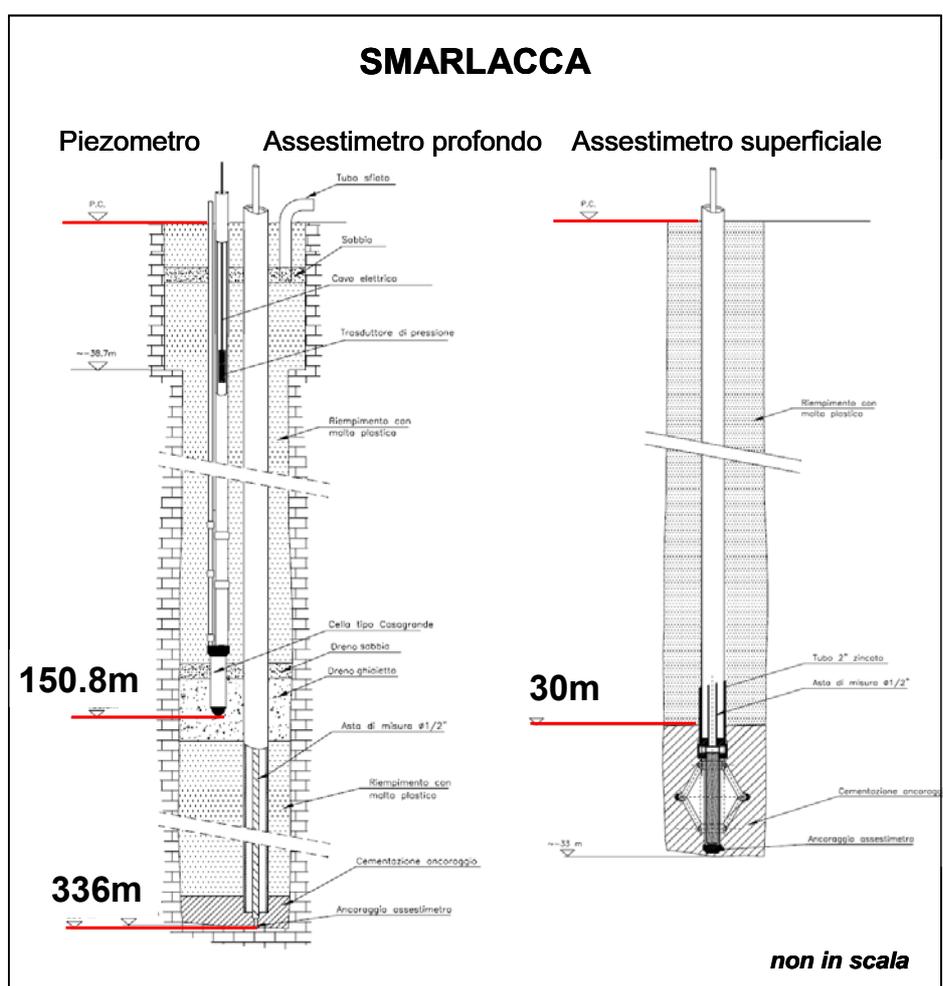
**N.B.:** Nella lettura dei dati riportati sui grafici relativi agli assestimetri, i valori positivi costituiscono la componente della compattazione (riduzione dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro); al contrario i valori negativi costituiscono la componente dell'espansione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

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

All’interno del pozzetto assestometrico 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 assestometrici**

L’assestometro 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’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.

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 un intervallo di 72 giorni; tale evento compare, anche se in misura minore, nel grafico dell’assestometro super-

ficiale (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 costanti. 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.

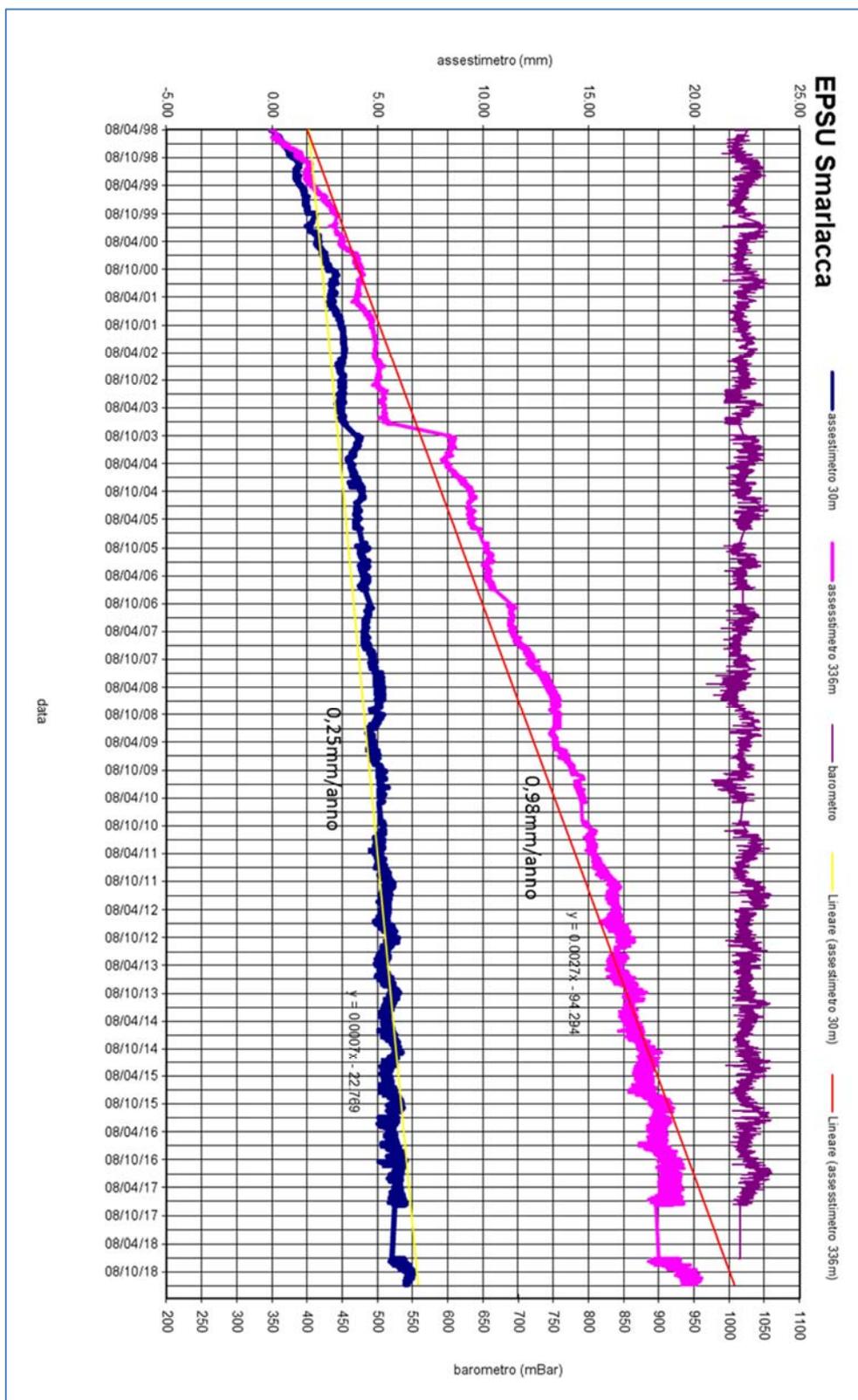


Figura 4B - Serie storica delle misure assestimentriche e barometriche nella stazione EPSU di Smarlacca

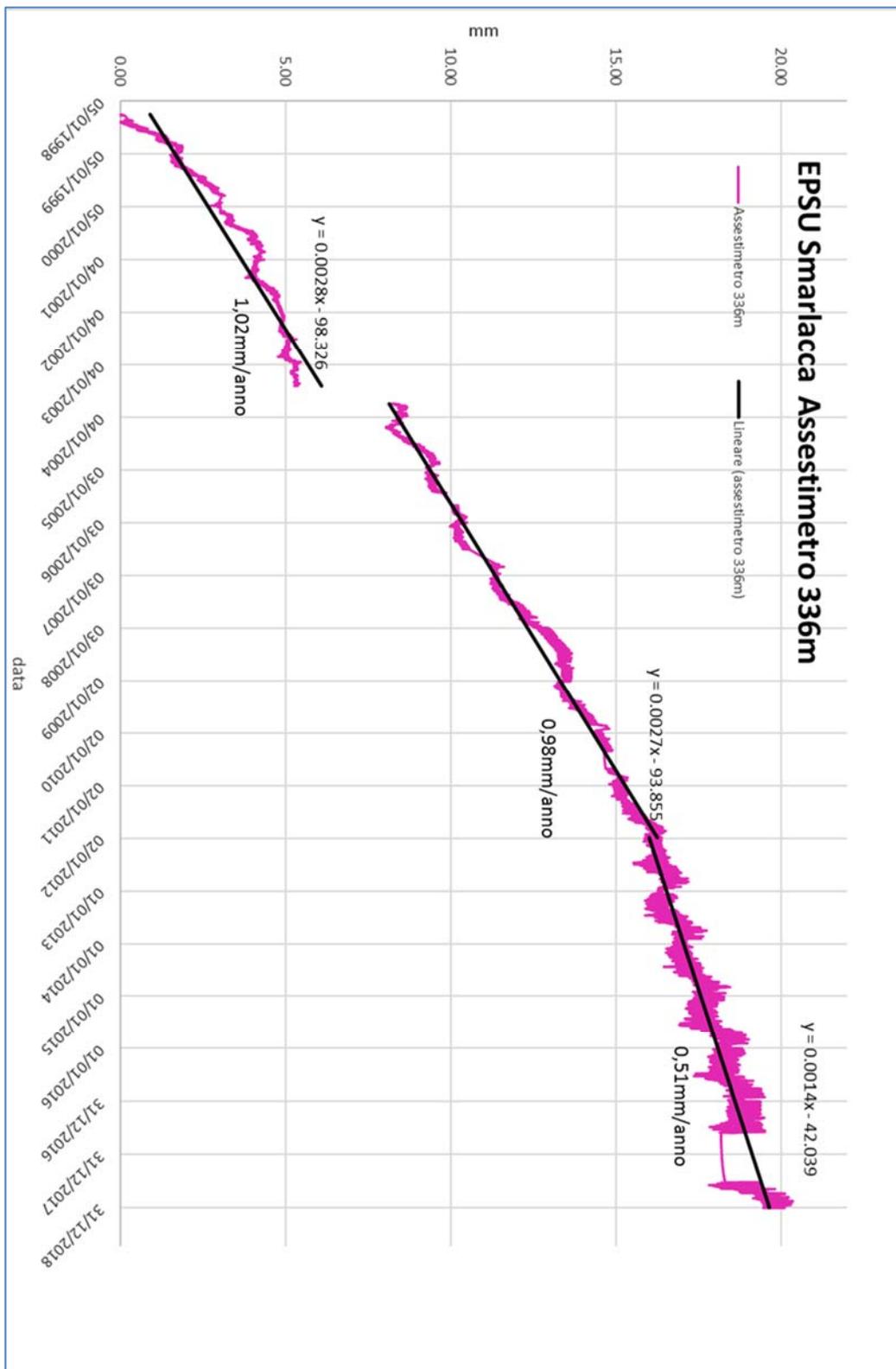
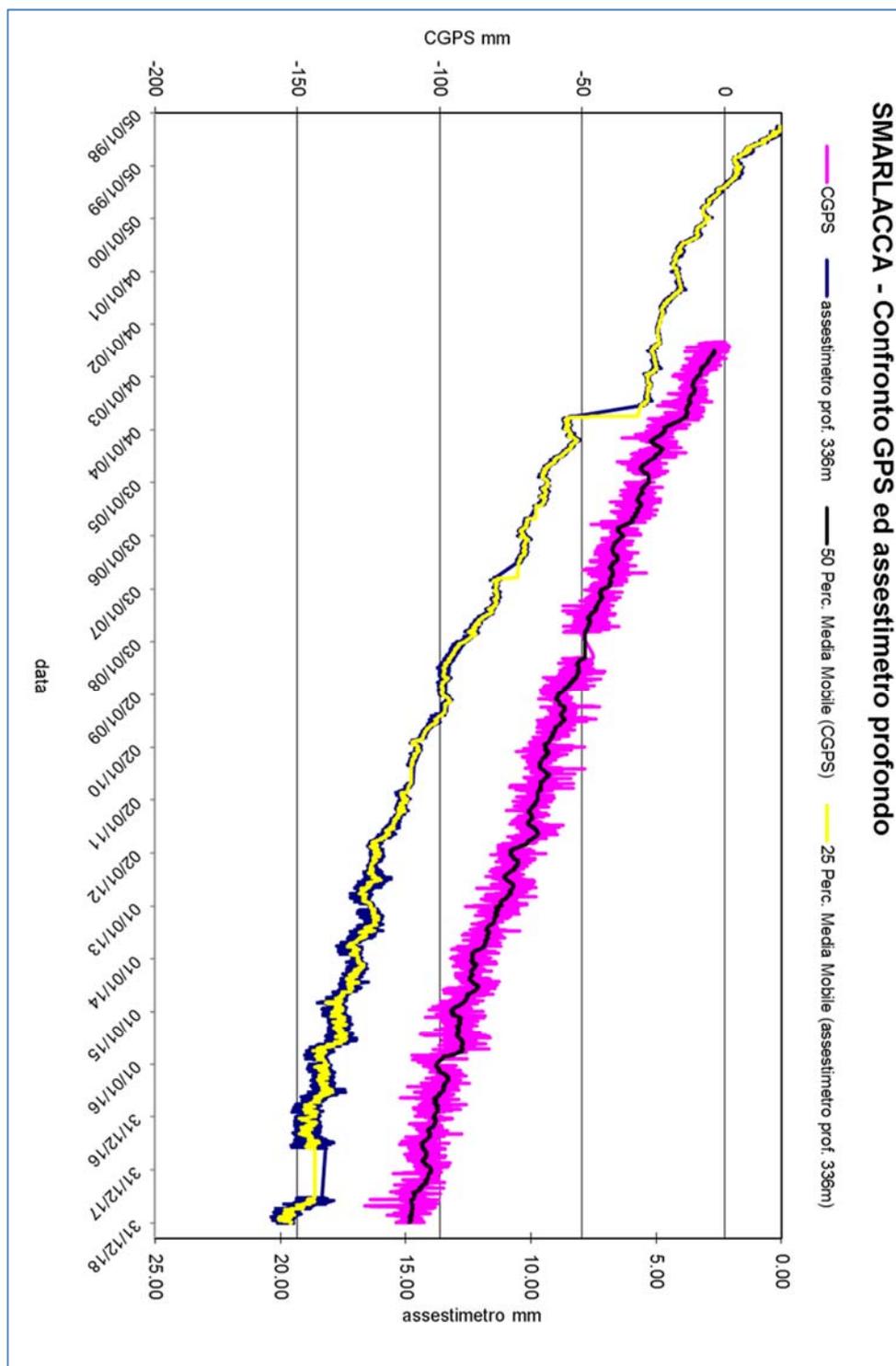


Figura 5B - Curva di compattazione dell'assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca



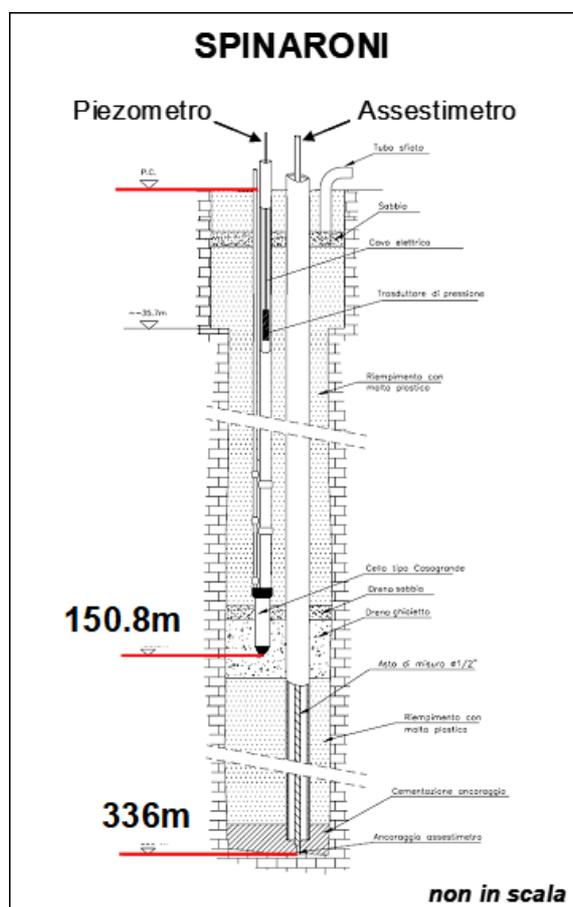
**Figura 6B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca)**

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 ( $\emptyset \frac{1}{2}$ "). 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 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 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 quel-

la 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 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). Il GPS infatti nei 16.66 anni di acquisizione ha regi-

strato 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.

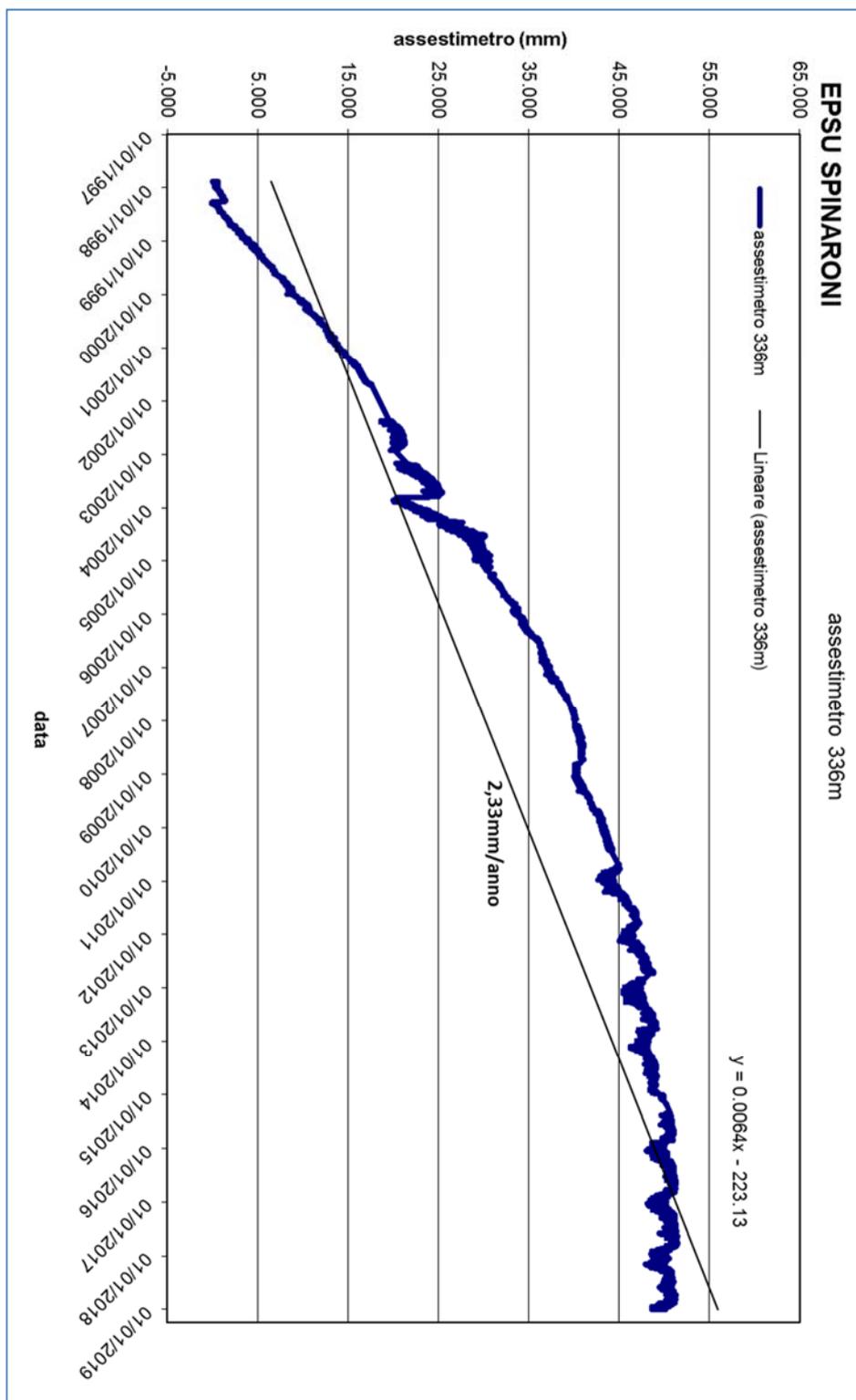


Figura 8B - Serie storica delle misure assestimetriche nella stazione EPSU di Spinaroni

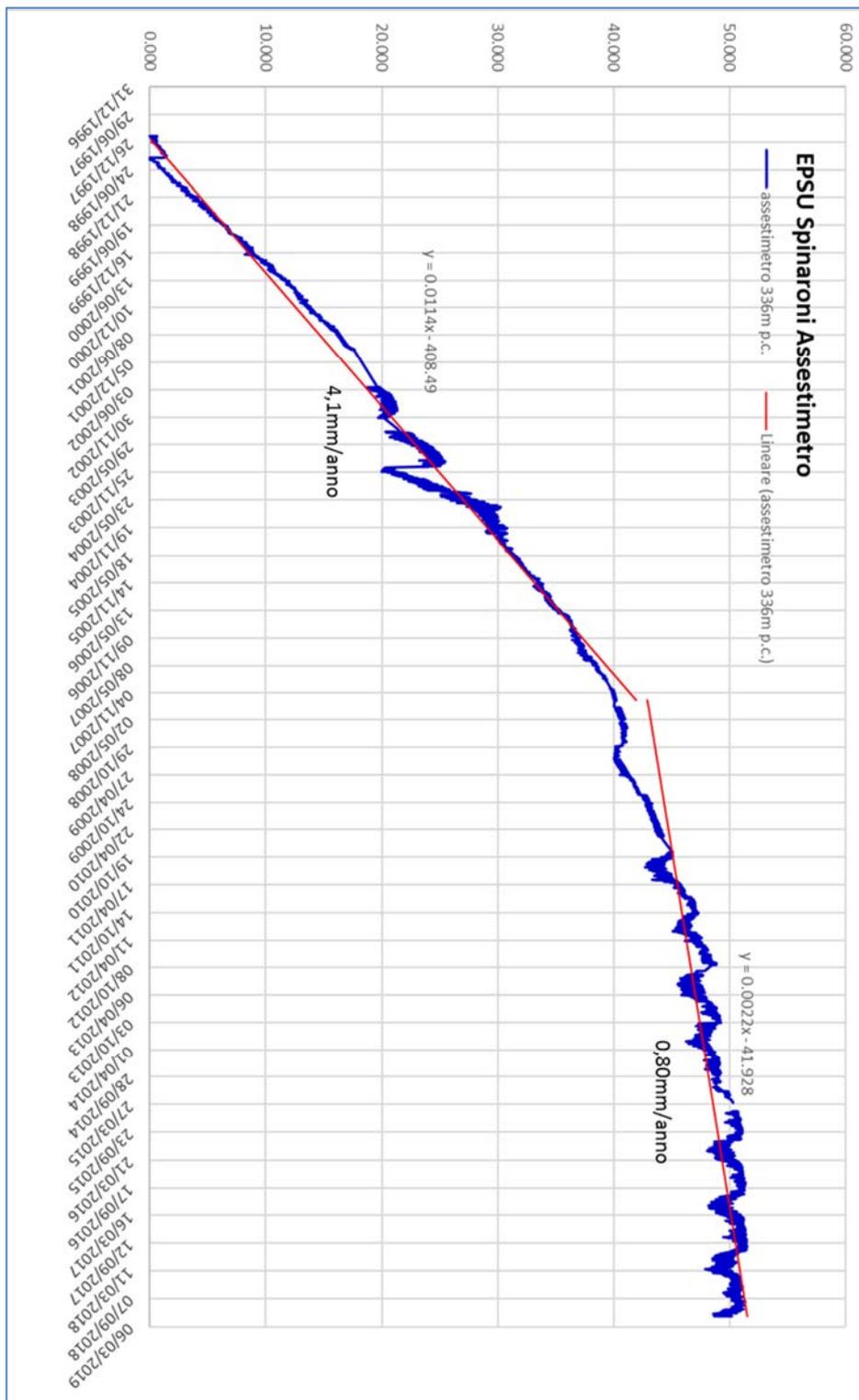
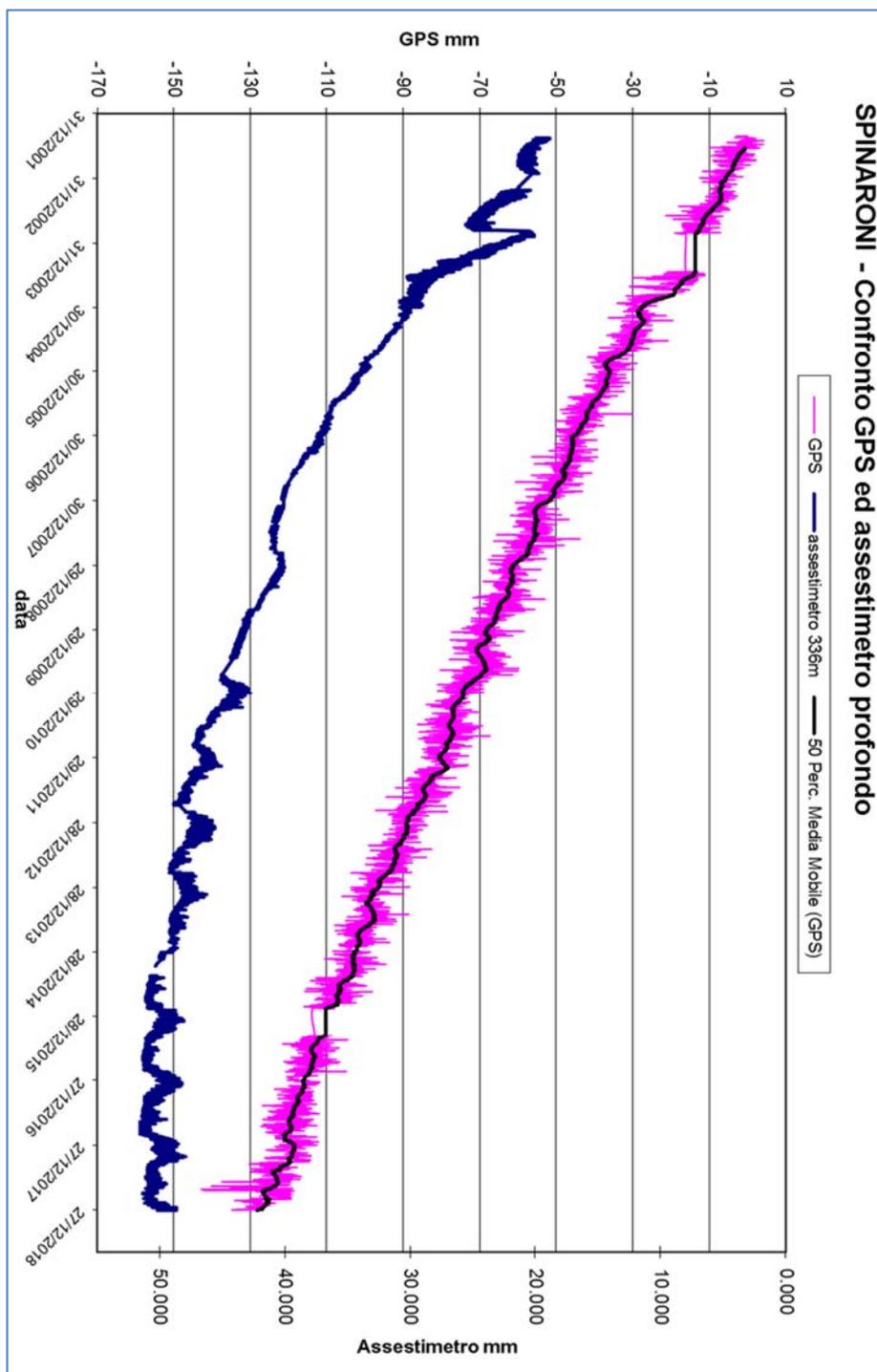


Figura 9B – Analisi di dettaglio della curva assestimetrica della stazione EPSU di Spinaroni



**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:

- 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)

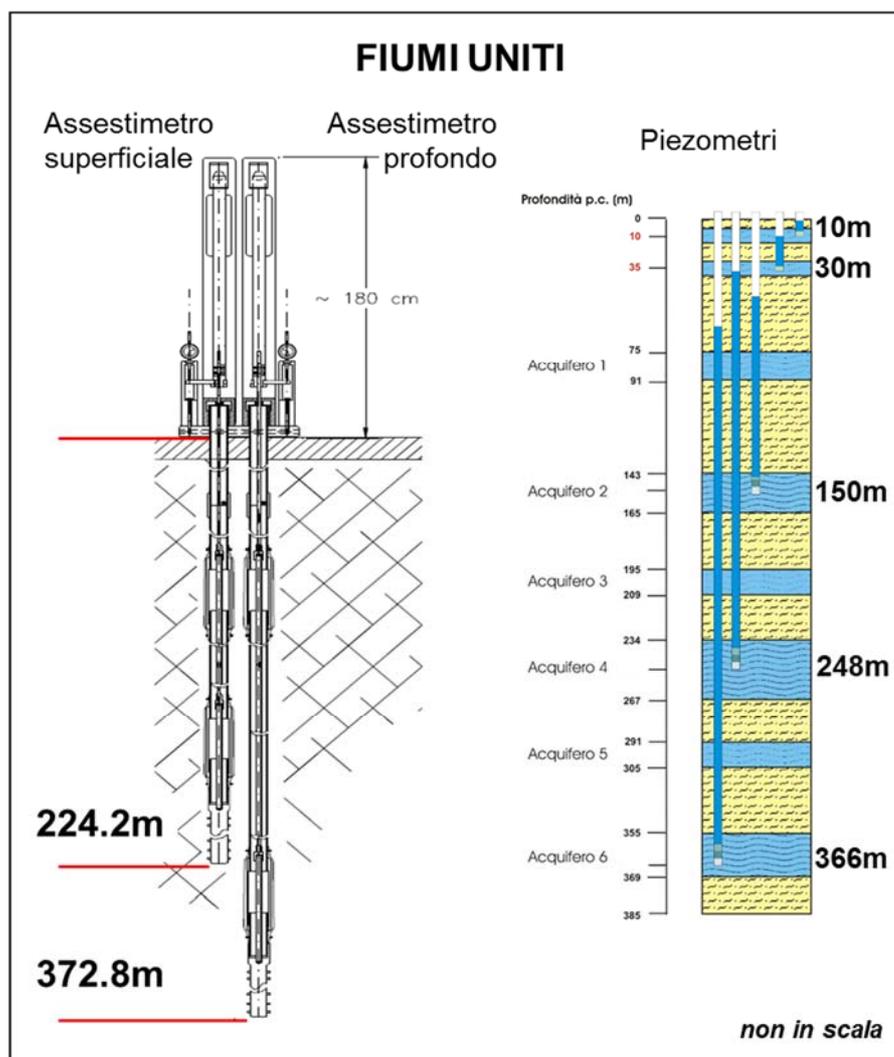


Figura 11B - Schema della stazione EPSU di Fiumi Uniti. Le profondità dei piezometri sono riferite alla quota centrale del tratto filtrante

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:

<b>Sigla</b>	<b>Profondità fondo foro (da p.c.)</b>	<b>Tipo Piezometro</b>	<b>Tratto Filtrante</b>
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 ot-

tobre 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.

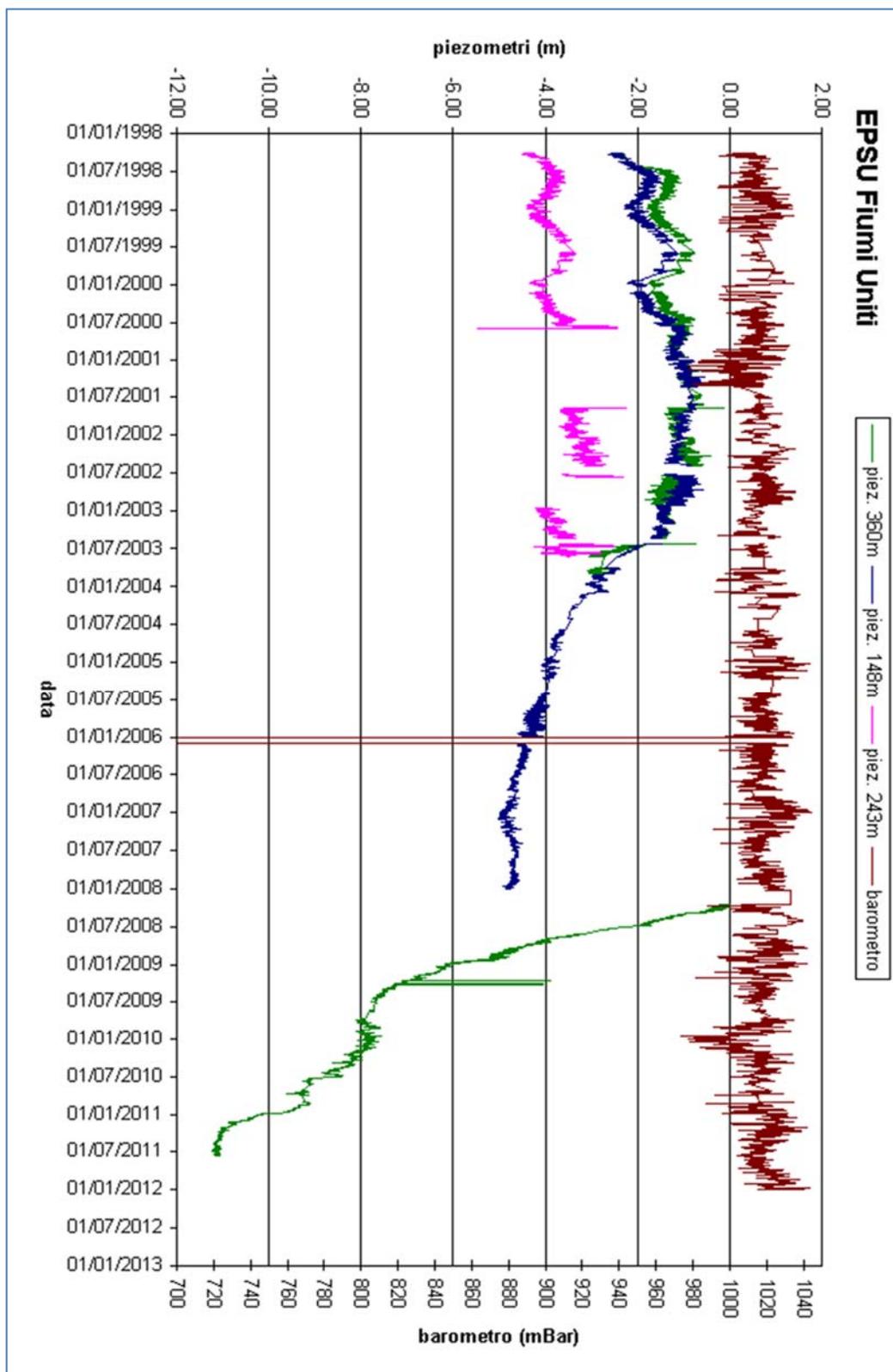


Figura 12B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure della strumentazione piezometrica-barometrica attiva sino al 2011

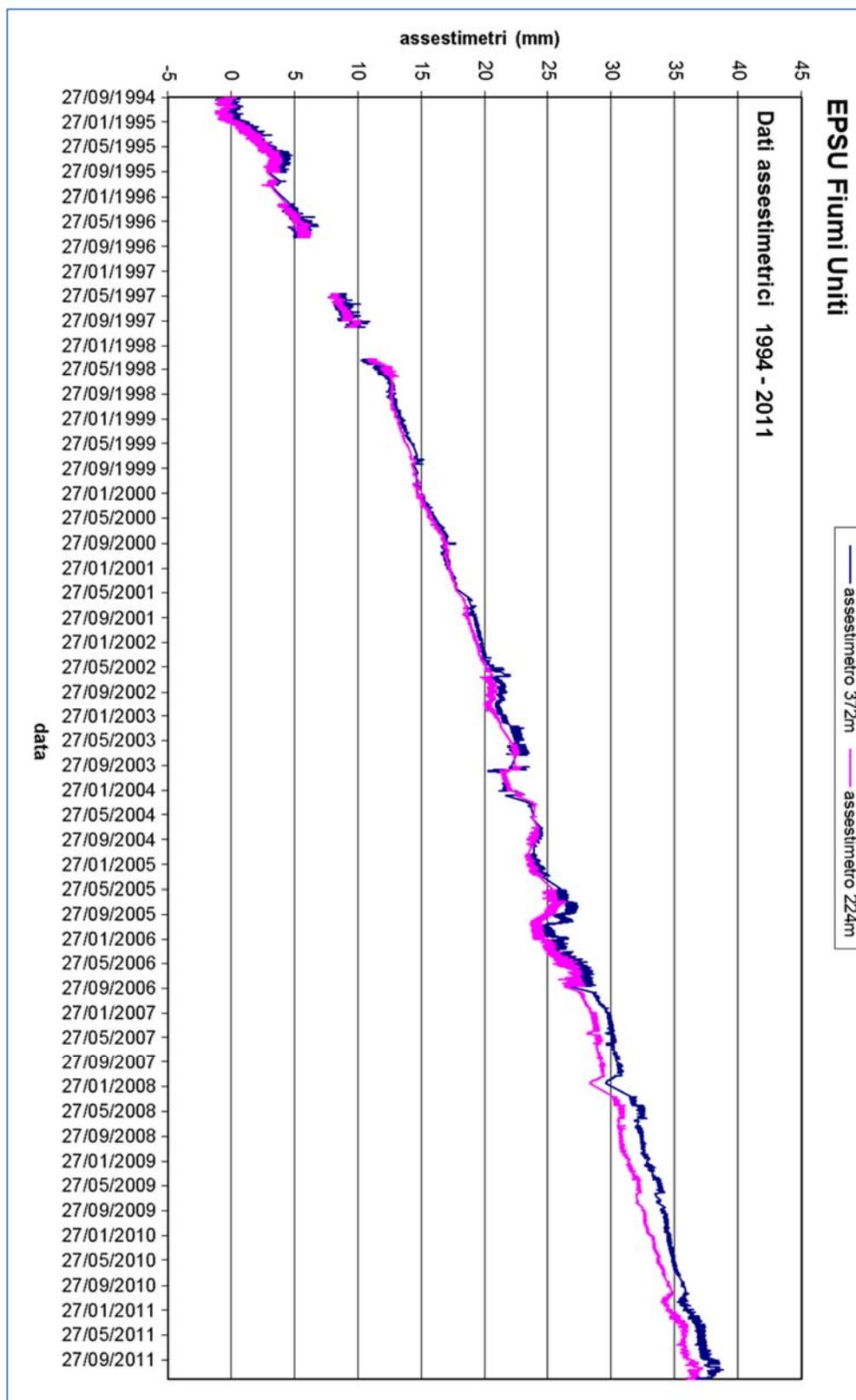


Figura 13B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 1994-2011)

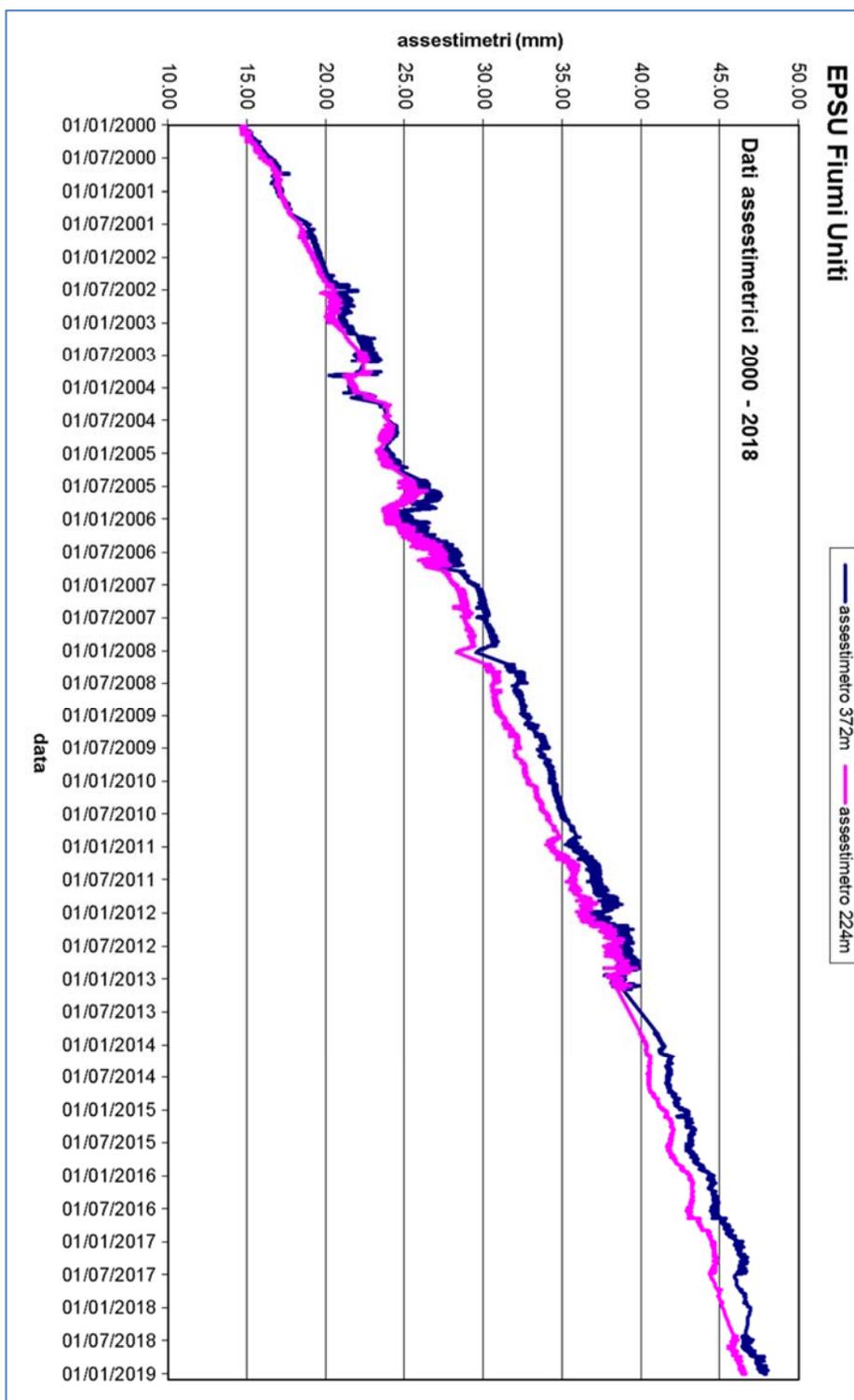


Figura 14B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 2000-2018)

Valori positivi = abbassamento; Valori negativi = sollevamento

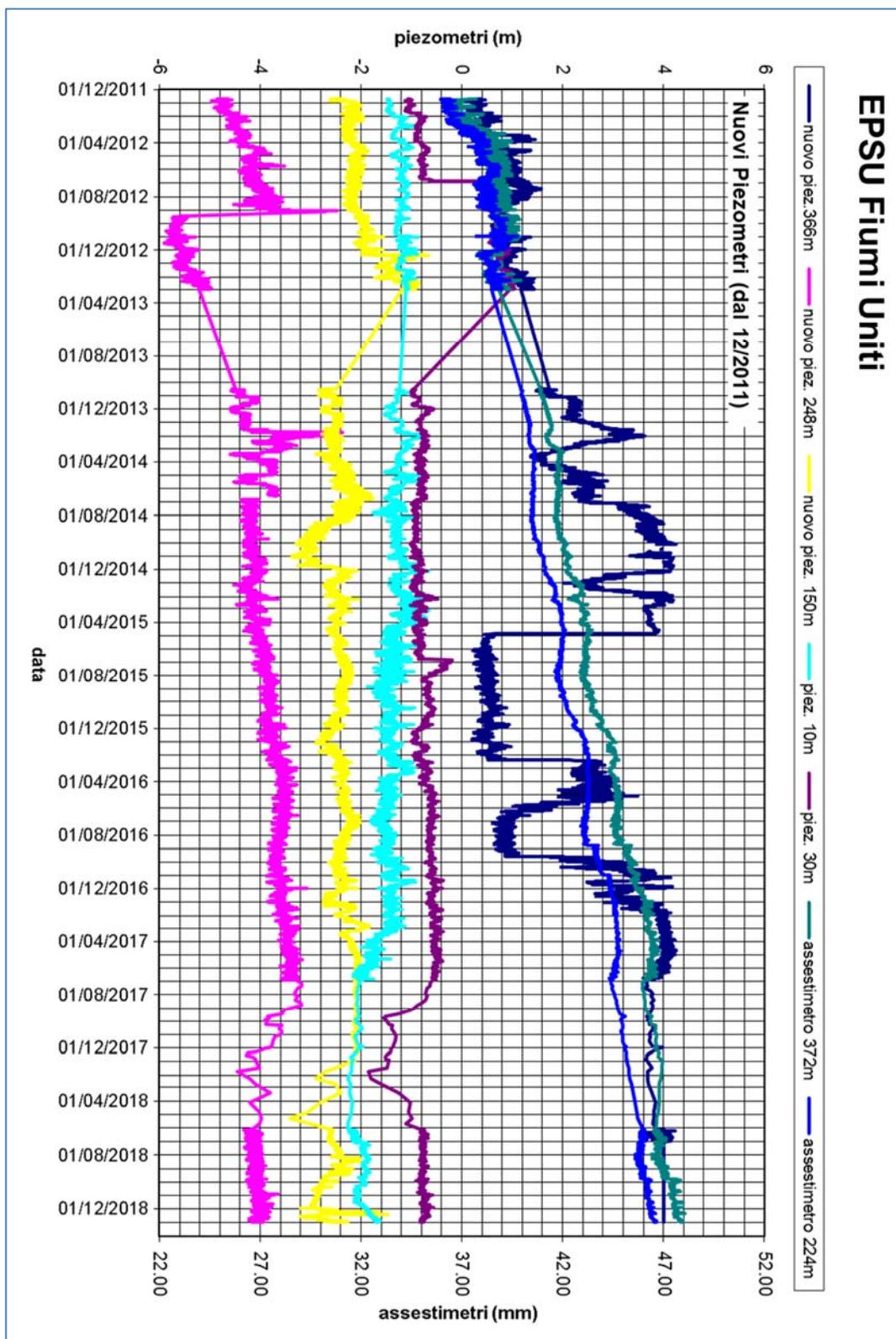


Figura 15B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e assestimetriche dal 2011 al 2018

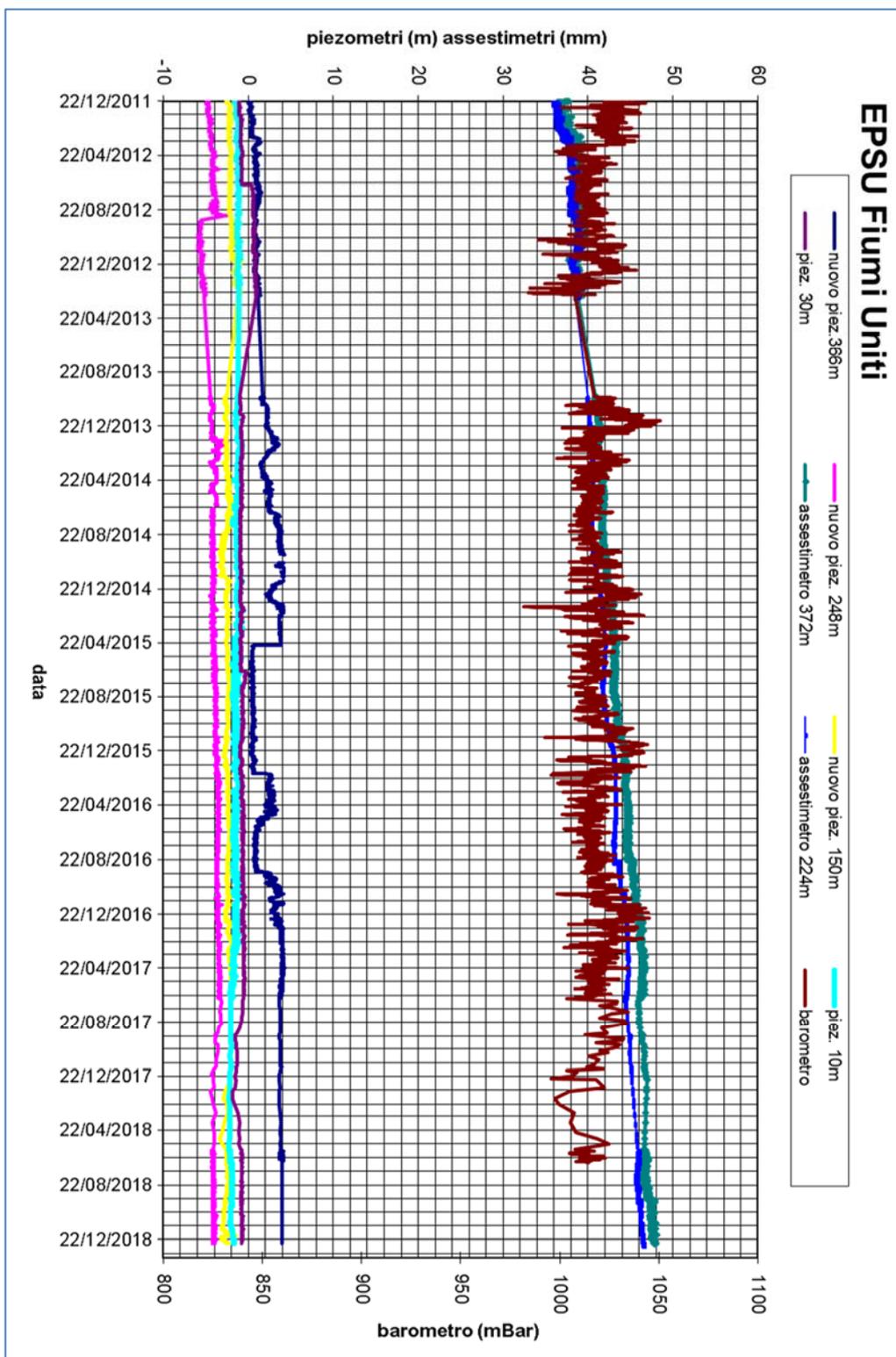
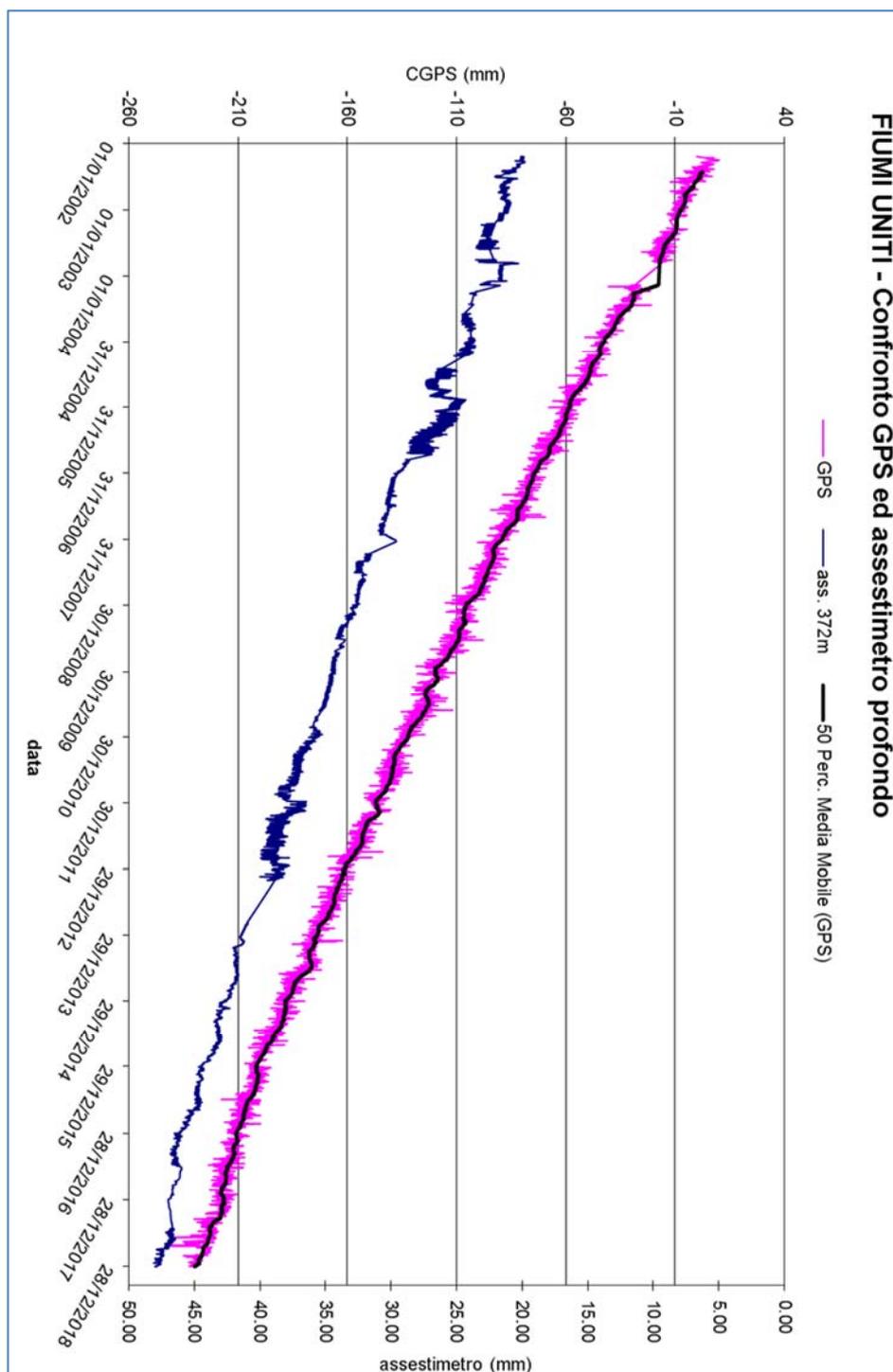


Figura 16B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e barometriche dal 2011 al 2018



**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 compattazione 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 compattazione 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 compattazione 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 compattazione 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 compattazione 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 correla-

zione 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)
<b>Smarlacca</b>	20.74	19.8	0.9	6.4	0.3
<b>Spinaroni</b>	21.13	49.00	2.3	n.i.	-
<b>Fiumi Uniti</b>	24.3	47.92	1.97	46.6	1.91

n.i. = non installato